

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Matija Mikulić

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Matija Mikulić

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, doc. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom strpljenju i povjerenju tijekom izrade završnog rada.

Zahvaljujem se asistentici, dr. sc. Maji Jurici na pomoći i strpljenju tijekom izrade završnog rada.

Zahvaljujem se i tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije na pomoći tijekom izvođenja eksperimentalnog dijela završnog rada.

Posebno se zahvaljujem obitelji i djevojci na podršci i strpljenju tijekom izrade završnog rada i tokom cijelog studija.

Matija Mikulić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MATIJA MIKULIĆ**

Mat. br.: **1191217464**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **IMPULSNO MAG ZAVARIVANJE VISOKOLEGIRANIH Cr-Ni ČELIKA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **PULSE MAG WELDING OF HIGHALLOYED Cr-Ni STEELS**

Opis zadatka:

Proučiti i obrazložiti osnovne značajke zavarljivosti visokolegiranih čelika obzirom na osnovnu mikrostrukturu. Opisati MAG postupak zavarivanja s posebnim naglaskom na impulsni prijenos metala u električnom luku. Objasniti način izbora dodatnih materijala i zaštitnog plina pri MAG zavarivanju visokolegiranih Cr-Ni čelika.

U eksperimentalnom dijelu za izabrani odgovarajući osnovni materijal i oblik spoja definirati tehnologiju impulsnog MAG zavarivanja. Posebno interpretirati količinu učešene topline i vrstu zaštitnog plina na svojstva i geometriju zavarenog spoja. Analizirati dobivene rezultate i donijeti zaključke o prikladnosti primijenjene tehnologije zavarivanja.

Zadatak zadao:

25. studenog 2015.

Zadatak zradio:

Doc. dr. sc. Ivica Guračić

Rok predaje rada:

- 1. rok: 25. veljače 2016.
- 2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
- 3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
- 2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
- 3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. ZAVARLJIVOST VISOKOLEGIRANIH Cr-Ni ČELIKA	2
2.1. Visokolegirani Cr-Ni čelici	2
2.1.1. Feritni nehrđajući čelici	3
2.1.2. Austenitni nehrđajući čelici	4
2.1.3. Dupleks (austenitno - feritni) nehrđajući čelici.....	6
2.1.4. Martenzitni nehrđajući čelici	7
2.2. Zavarljivost visokolegiranih Cr-Ni čelika.....	11
3. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE TALJIVOM ELEKTRODOM U ZAŠTITNOJ ATMOSFERI AKTIVNOG PLINA (MAG ZAVARIVANJE)	14
3.1. Povijest i razvoj MAG postupka zavarivanja	14
3.2. Općenito o MAG postupku zavarivanja.....	15
3.2.1. Osnovni parametri MAG zavarivanja	17
3.2.2. Načini prijenosa metala u električnom luku	19
3.3. Dodatni materijali za MAG zavarivanje visokolegiranih Cr-Ni čelika	23
3.4. Zaštitni plinovi za MAG zavarivanje visokolegiranih Cr-Ni čelika	24
4. EKSPERIMENTALNI DIO	26
4.1. Oprema i materijali korišteni za izradu eksperimentalnog dijela rada.....	26
4.1.1. Oprema za zavarivanje.....	26
4.1.2. Osnovni materijal	27
4.1.3. Dodatni materijal	28
4.1.4. Zaštitni plin	28
4.2. Priprema spoja.....	29
4.3. Parametri zavarivanja.....	30
4.3.1. Uzorak „A“	31
4.3.2. Uzorak „B“	33
4.4. Izrada makroizbrusaka	35
4.5. Geometrija zavara	38
5. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA.....	43
PRILOZI.....	45

POPIS SLIKA

Slika 1.	Karakteristične mikrostrukture pojedinih grupa nehrđajućih čelika [5]	3
Slika 2.	Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [7]	3
Slika 3.	Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika [7]	5
Slika 4.	Mikrostruktura dupleks nehrđajućih čelika [11]	6
Slika 5.	Promjena udjela austenita i ferita s promjenom temperature zagrijavanja [7]	7
Slika 6.	Mikrostruktura martenzitnih nehrđajućih čelika [12]	8
Slika 7.	Ispravne toplinske operacije pri zavarivanju martenzitnih nehrđajućih čelika [7] .	9
Slika 8.	Lokacije i orijentacije hladnih pukotina [13]	10
Slika 9.	Shema uzročnika nastajanja hladnih pukotina [13]	11
Slika 10.	Schaffler-ov dijagram [14]	12
Slika 11.	Shematski prikaz MAG zavarivanja [17]	15
Slika 12.	Ovisnost jakosti struje o promjeru žice i brzini zavarivanja [2]	17
Slika 13.	Slobodni kraj žice [2]	18
Slika 14.	Prijenos metala kratkim spojevima - faze impulsa [20]	19
Slika 15.	Prijenos metala prijelaznim lukom [2]	20
Slika 16.	Prijenos metala štrcajućim lukom [2]	21
Slika 17.	Prijenos metala impulsnim lukom - promjena struje zavarivanja ovisno o vremenu [21]	22
Slika 18.	Izvor struje za zavarivanje Welbee Inverter P400	26
Slika 19.	Sustav za automatsko pokretanje pištolja za zavarivanje	27
Slika 20.	Prikaz dimenzija pripremljenog spoja	29
Slika 21.	Usporedni prikaz izgleda probnih zavora	31
Slika 22.	Podešeni parametri za zavarivanje uzorka „A“	32
Slika 23.	Uzorak „A“	33
Slika 24.	Podešeni parametri za zavarivanje uzorka „B“	34
Slika 25.	Uzorak „B“	35
Slika 26.	Makroizbrusci nakon završnog brušenja	36
Slika 27.	Makroizbrusak presjeka zavora - uzorak „A“	37
Slika 28.	Makroizbrusak presjeka zavora - uzorak „B“	37
Slika 29.	Prikaz mjerenja širine i visine zavora. Uzorak „A“ - lijevo, uzorak „B“ - desno	38
Slika 30.	Prikaz mjerenja površine presjeka zavora. Uzorak „A“ - lijevo, uzorak „B“ - desno	39
Slika 31.	Prikaz mjerenja penetracije zavora. Uzorak „A“ - lijevo, uzorak „B“ - desno	39
Slika 32.	Grafički prikaz izmjerenih veličina uzoraka „A“ i „B“	40
Slika 33.	Pojava šupljine na uzorku „B“	41

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehničke specifikacije izvora struje za zavarivanje Welbee Inverter P400.....	27
Tablica 2. Kemijski sastav čelika X5CrNiMo17-12-2.....	27
Tablica 3. Mehanička svojstva čelika X5CrNiMo17-12-2	28
Tablica 4. Mehanička svojstva dodatnog materijala 316L.....	28
Tablica 5. Kemijski sastav dodatnog materijala 316L	28
Tablica 6. Usporedni prikaz parametara probnih zavarivanja.....	30
Tablica 7. Parametri pri zavarivanju ispitnog uzorka „A“	31
Tablica 8. Parametri pri zavarivanju ispitnog uzorka „B“	33
Tablica 9. Izmjerene veličine zavora uzorka „A“	40
Tablica 10. Izmjerene veličine zavora uzorka „B“	40

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Q	kJ/cm	Unos topline prilikom zavarivanja
U	V	Napon zavarivanja
I	A	Struja zavarivanja
v_z	cm/min	Brzina zavarivanja
η	-	Koeficijent korisnog djelovanja električnog luka
Z	mm	Širina zavara
A	mm	Visina zavara
n	mm	Nadvišenje zavara

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
MIG	eng. Metal Inert Gas
MAG	eng. Metal Active Gas
BCC	eng. Body Centred Cube
STT	eng. Surface Tension Transfer
RMT	eng. Rapid MIG/MAG Technology
DC	eng. Direct Current

SAŽETAK

U teoretskom dijelu rada opisani su razvoj i podjela nehrđajućih čelika s naglaskom na njihovu zavarljivost te nakon toga razvoj procesa MAG zavarivanja i njegovi parametri, načini prijenosa metala s naglaskom na prijenos metala impulsnim lukom, dodatni materijali i zaštitni plinovi koji se koriste za zavarivanje nehrđajućih čelika. Nakon teoretskog dijela uslijedio je eksperimentalni dio. U eksperimentalnom dijelu završnog rada opisani su koraci izrade dva ispitna uzorka austenitnog nehrđajućeg čelika zavarivanih MAG postupkom zavarivanja pod zaštitom različitih plinskih mješavina u svrhu kvantificiranja utjecaja zaštitnog plina na svojstva i geometriju zavarenog spoja.

Ključne riječi: nehrđajući čelik, MAG, impulsni luk

SUMMARY

In the theoretical part, the paper describes the development and distribution of stainless steel with an emphasis on its weldability. Furthermore, the development process of MAG welding and its parameters are discussed, as well as modes of metal transmission with an emphasis on the transfer of metal by pulsed arc, filler materials and shielding gases used for welding of stainless steel. The theoretical part is followed by the experimental part. In the experimental part of the paper, the steps of making two test specimens of austenitic stainless steel welded by MAG procedure under the protection of various gas mixtures in order to quantify the impact of the active gas on the properties and the geometry of the weld are explained.

Key words: Stainless steel, MAG, pulsed arc

1. UVOD

U svrhu sprječavanja i smanjenja utjecaja raznih oblika korozije nastali su nehrđajući čelici koji od 1950. do danas bilježe najveći porast potrošnje i nalaze široku primjenu u raznim granama industrije. Ovisno o udjelima legirnih elemenata razlikuje se nekoliko osnovnih vrsta nehrđajućih čelika od kojih svaka ima posebna svojstva [1]:

- feritni nehrđajući čelici,
- austenitni nehrđajući čelici,
- dupleks nehrđajući čelici,
- martenzitni nehrđajući čelici.

Najčešći postupak zavarivanja primjenjivan za zavarivanje nehrđajućih čelika je MIG/MAG postupak (elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plina).

MAG postupak zavarivanja (elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina) dominantan je postupak u današnje vrijeme. Neprestani razvoj i razna poboljšanja rezultirali su visokom kvalitetom i produktivnosti procesa. Koristi se za zavarivanje širokog spektra konstrukcija i proizvoda (čelične konstrukcije, mostovi, automobilska industrija, brodogradnja, cjevovodi, ...). Tu široku upotrebu omogućuje izbor između nekoliko načina prijenosa metala u električnom luku [2]:

- kratkim spojevima,
- prijelaznim lukom,
- štrcajućim lukom,
- impulsnim lukom,

Parametri zavarivanja i način rukovanja opremom za zavarivanje imaju najveći utjecaj na samu kvalitetu zavora [2].

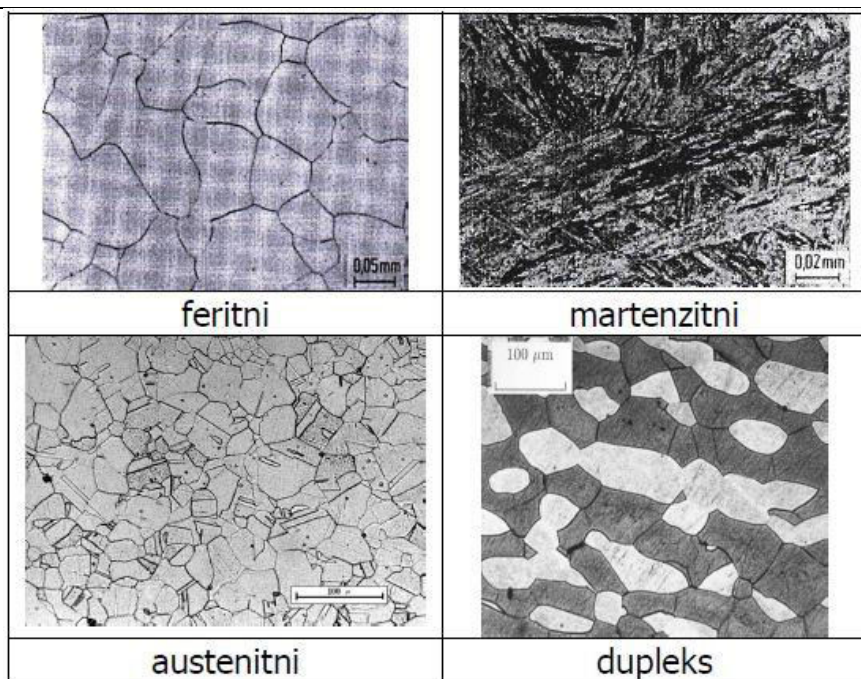
2. ZAVARLJIVOST VISOKOLEGIRANIH Cr-Ni ČELIKA

2.1. Visokolegirani Cr-Ni čelici

Visokolegirani Cr-Ni čelici pojavili su se početkom 20. stoljeća, točnije 1912. godine kada ih je patentirao proizvođač čelika Krupp i od tada su u konstantnom razvoju. U posljednjih 25 godina proizvodnja visokolegiranih čelika se udvostručila iz čega se vidi njihova važnost u industriji. Nazivaju se još nehrđajući čelici (eng. stainless steel) i korozijski postojani čelici. Obilježja visokolegiranih Cr-Ni čelika su minimalan udio kroma od 10,5% i dodatak još nekih legirajućih elemenata kao što su nikal, molibden, titan, bakar, dušik i ugljik kojima se modificira njihova struktura ili poboljšavaju svojstva obradivosti, čvrstoće, žilavosti na sniženim temperaturama ili korozijske postojanosti. Zbog korozijske postojanosti prvenstveno se koriste za specifičnu primjenu ili specifični okoliš. Visokolegirani Cr-Ni čelici definirani su nacionalnim standardima (HRN, DIN, AISI), a u našem okruženju ustalila se upotreba oznaka prema američkom standardu AISI (American Iron and Steel Institute) i to vjerojatno zbog utjecaja brodogradnje [3, 4, 5].

Danas, prema podjeli izvršenoj na osnovi mikrostrukturnih obilježja, visokolegirane Cr-Ni čelike dijelimo na četiri osnovne grupe (usporedba njihovih mikrostrukture prikazana je na slici 1.) [5]:

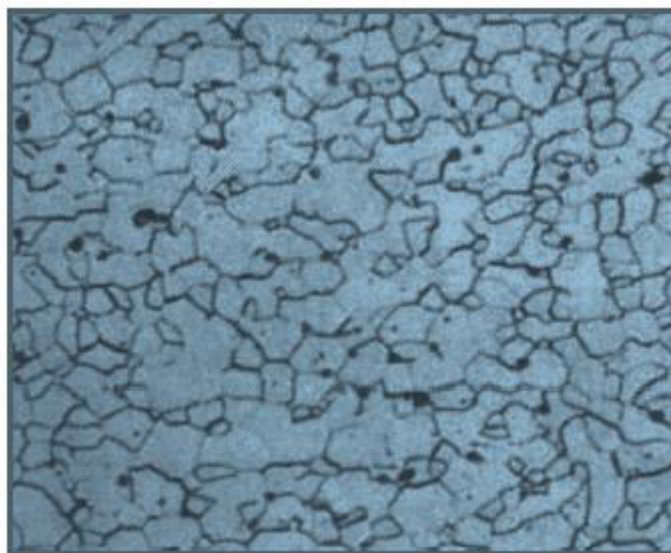
- feritni čelici,
- austenitni čelici,
- dupleks (austenitni - feritni) čelici,
- martenzitni čelici.



Slika 1. Karakteristične mikrostrukture pojedinih grupa nehrđajućih čelika [5]

2.1.1. Feritni nehrđajući čelici

Feritni nehrđajući čelici sadrže od 12 do 17 %Cr i manje od 0,1 %C. Pri gotovo svim temperaturama zadržavaju feritnu mikrostrukturu (ne mogu očvrsnuti postupcima toplinske obrade jer nemaju faznu pretvorbu) koja je prikazana na slici 2.. Takav ferit se naziva δ -ferit (prostorno centrirana kubna rešetka - BCC) [6].



Slika 2. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [7]

Prednosti feritnih čelika su visoka korozijska otpornost na djelovanje dušične kiseline i njenih vodenih otopina, smjesa dušične, fosforne i solne kiseline dok na djelovanje

rastaljenih metala (Al, Sb, Pb), amonijevog biflourida, barijevog klorida, broma i octene kiseline nisu otporni [7].

Ostala svojstva feritnih nehrđajućih čelika [7]:

- relativno su mekani,
- feromagnetični su,
- slabo su zavarljivi zbog sklonosti pogrubljenju zrna pri temperaturama iznad 900 °C što je najviše izraženo na područjima ZUT-a (već iznad 600 °C veličina zrna počinje znatno rasti što rezultira padom mehaničkih vrijednosti),
- skloni su stvaranju krhke σ -faze pri držanju u temperaturnom rasponu od 520 °C do 850 °C,
- skloni su pojavi „krhkosti 475“ pri držanju u temperaturnom rasponu od 350 °C do 520 °C (posljedice su smanjenje duktilnosti i povećanje čvrstoće i tvrdoće),
- slaba deformabilnost,
- dobra obradljivost odvajanjem čestica,
- nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije,
- ekonomski prihvatljiviji od ostalih nehrđajućih čelika,
- skloni su lomu pri niskim temperaturama.

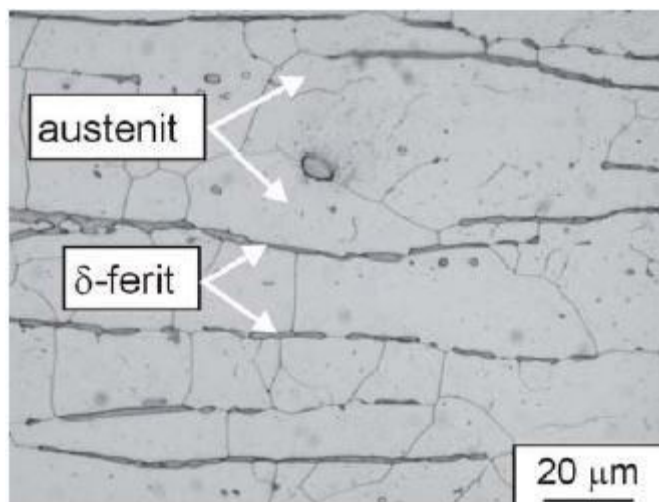
Uklanjanje ili smanjenje navedenih nedostataka postiže se povišenjem udjela kroma, sniženjem udjela ugljika ili legiranjem s molibdenom (Mo) i niklom (Ni) u svrhu povećanja njihove otpornosti na koroziju i titanom (Ti) i niobijem (Nb) u svrhu poboljšanja zavarljivosti. Velika poboljšanja svojstava postižu se i porastom čistoće feritnih čelika (vrlo niski udjeli nečistoća i primjesa) što se postiže pomoću suvremenih metoda rafinacije (npr. indukcijska vakuumaska peć, elektronski mlaz i sl.) [7].

Za zavarivanje feritnih nehrđajućih čelika preporučuju se postupci zavarivanja kojima se unosi manja količina topline. Potrebno je koristiti sušene bazično obložene elektrode i prašak i predgrijati na temperaturni raspon od 200 °C do 300 °C [7, 8].

2.1.2. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici sadrže od 15 do 20 %Cr, između 0,02 i 0,15 %C i između 7 i 20 %Ni uz mogućnost dodavanja određene količine molibdena, titana, niobija i tantala koji pospješuju nastanak ferita u mikrostrukturi i djeluju stabilizirajuće na otpornost prema interkristalnoj koroziji, a dodaje se i dušik radi povišenja čvrstoće i otpornosti na napetosnu i rupičastu koroziju. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika prikazana je na slici 3..

Zbog svoje dobre korozijske postojanosti, dobre obradivosti i zavarljivosti, mehaničkih svojstava i estetskih karakteristika austenitni čelici su najčešće korištena vrsta nehrđajućih čelika [7, 8].



Slika 3. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika [7]

Ostala svojstva austenitnih nehrđajućih čelika [7, 9]:

- nema mogućnosti usitnjavanja zrna,
- nemagnetični su,
- veće su napetosti i deformacije tijekom zavarivanja nego kod feritnih čelika,
- odlična plastičnost,
- dobra otpornost prema puzanju pri temperaturama iznad 600 °C može se postići legiranjem s molibdenom, volframom i vanadijem,
- visoka žilavost te visoka oksidacijska i korozijska otpornost,
- visok odnos čvrstoća/masa,
- pri niskim temperaturama također imaju dobra svojstva,
- postojana austenitna struktura od „solidus“ temperature do ispod sobne temperature,
- kubično plošno centrirana (FCC) rešetka koja osigurava visoku deformabilnost,
- nisu skloni povećanju zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja,
- nisu sposobni da se zakale ili poboljšaju transformacijom jer nema faznih transformacija.

Problem kod ove vrste čelika je osjetljivost na napetosnu koroziju u slučaju koje su pukotine najčešće transkristalne, odnosno direktno se šire kroz kristal. Njihovu uporabu

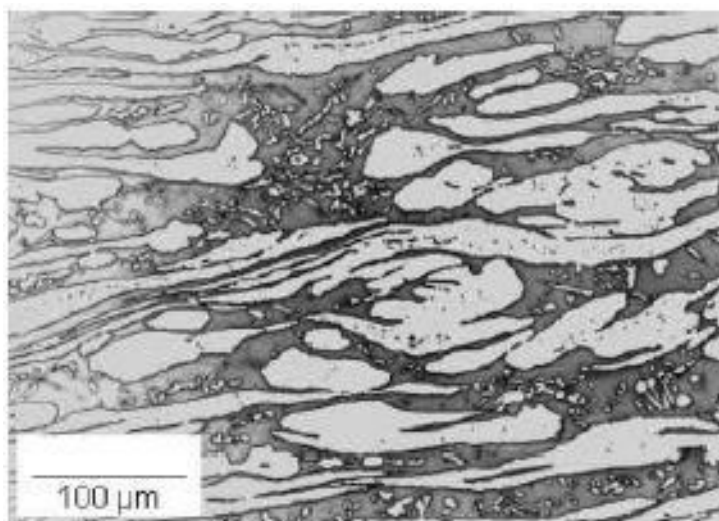
otežava i mogućnost pojave senzibilizacije prilikom zavarivanja što za posljedicu može imati pojavu interkristalne korozije [5].

Opći zahtjevi pri zavarivanju austenitnih čelika [10]:

- otklanjanje opasnosti od toplih pukotina izborom dodatnog materijala koji osigurava sadržaj δ – ferita,
- prije zavarivanja potrebno je dobro očistiti i odmastiti površinu,
- što kraći električni luk,
- tanke materijale nije potrebno predgrijavati, dok je deblje materijale potrebno predgrijati u temperaturnom rasponu od 100 do 150 °C,
- primjena dodatnih materijala sa što nižim postotkom ugljika,
- potrebno je koristiti poseban način pripajanja, naprave za stezanje i slijediti redoslijed zavarivanja zbog jakih deformacija,
- ne smije se ravnati plinskim plamenom jer može doći do pojave korozije,
- čekić i četka moraju biti isključivo od nehrđajućeg Cr ili Cr-Ni čelika.

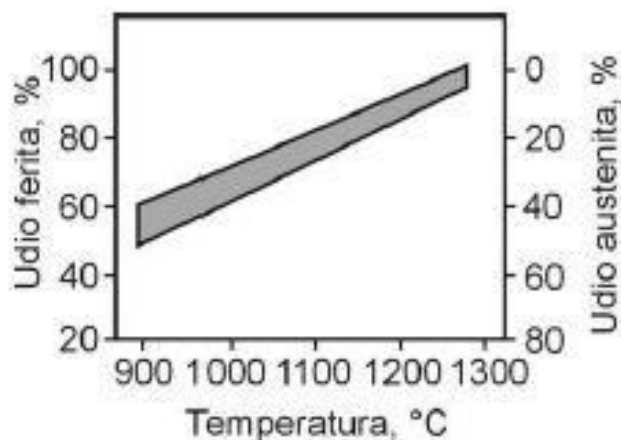
2.1.3. *Dupleks (austenitno - feritni) nehrđajući čelici*

Dupleks nehrđajući čelici posjeduju dvofaznu austenitno-feritnu strukturu s 40-60 % ferita. Previsoki udio ferita u mikrostrukturi, koja je prikazana na slici 4., može uzrokovati sniženje korozijske postojanosti i pojavu krhkosti pa je zbog toga održavanje dovoljno visokog udjela austenita jedan od glavnih ciljeva legiranja dupleks čelika. To je posebno važno tijekom zavarivanja u zoni taljenja zavarenog spoja [7].



Slika 4. Mikrostruktura dupleks nehrđajućih čelika [11]

Omjer austenita i ferita u mikrostrukturi dupleks čelika ovisi i o temperaturi toplinske obrade kako je prikazano na slici 5.[7].



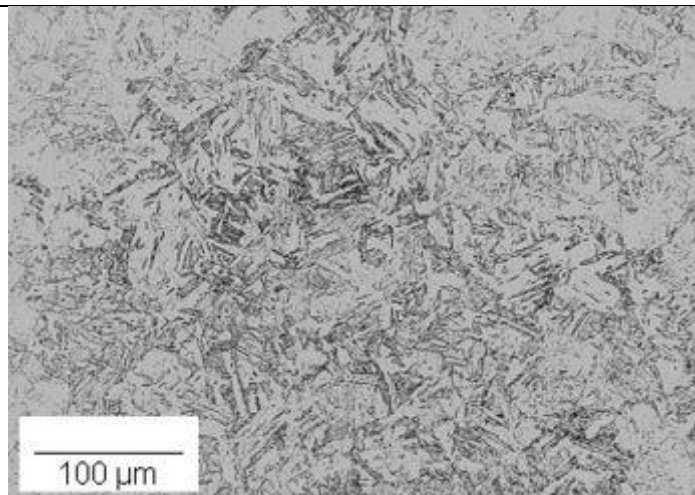
Slika 5. Promjena udjela austenita i ferita s promjenom temperature zagrijavanja [7]

Svojstva dupleks nehrđajućih čelika [7]:

- povećana otpornost prema napetosnoj koroziji i utjecaju klorida,
- povećanjem udjela ferita povisuje se postojanost prema interkristalnoj koroziji,
- bolja otpornost na opću i rupičastu koroziju u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike,
- veća čvrstoća u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike,
- teže se stvaraju karbidi Cr_{23}C_6 ,
- primjene na povišenim temperaturama moguće su do maksimalno 350 °C zbog pojave „krhkosti 475“ koja se javlja u feritnoj fazi (kao i kod feritnih nehrđajućih čelika),
- magnetični su,
- temperature primjene su od -50 do 350 °C.

2.1.4. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući čelici u pravilu imaju od 13 do 18 %Cr, te zbog potrebe zakaljivanja imaju povišen udio C koji iznosi od 0,2 do 1 %. U mikrostrukturi, prikazanoj slikom 6., mogu sadržavati i do 2,5 %Ni i do 1,3 %Mo. Kaljenjem na zraku ili u ulju i nakon toga popuštanjem postižu se optimalna mehanička svojstva i korozijska postojanost martenzitnih nehrđajućih čelika. Martenzitni čelici iz taline kristaliziraju u δ -ferit, a zatim pri hlađenju prelaze u austenit koji daljnjim hlađenjem prelazi u martenzit [7].



Slika 6. Mikrostruktura martenzitnih nehrđajućih čelika [12]

Martenzitni nehrđajući čelici dijele se u dvije podskupine [7]:

- konstrukcijski čelici - koji sadrže do 0,3 %C, poboljšavaju se i korozijski su postojani,
- alatni čelici - koji sadrže preko 0,3 %C, nakon kaljenja se nisko popuštaju i otporni su na abrazijsko trošenje.

Svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika [7]:

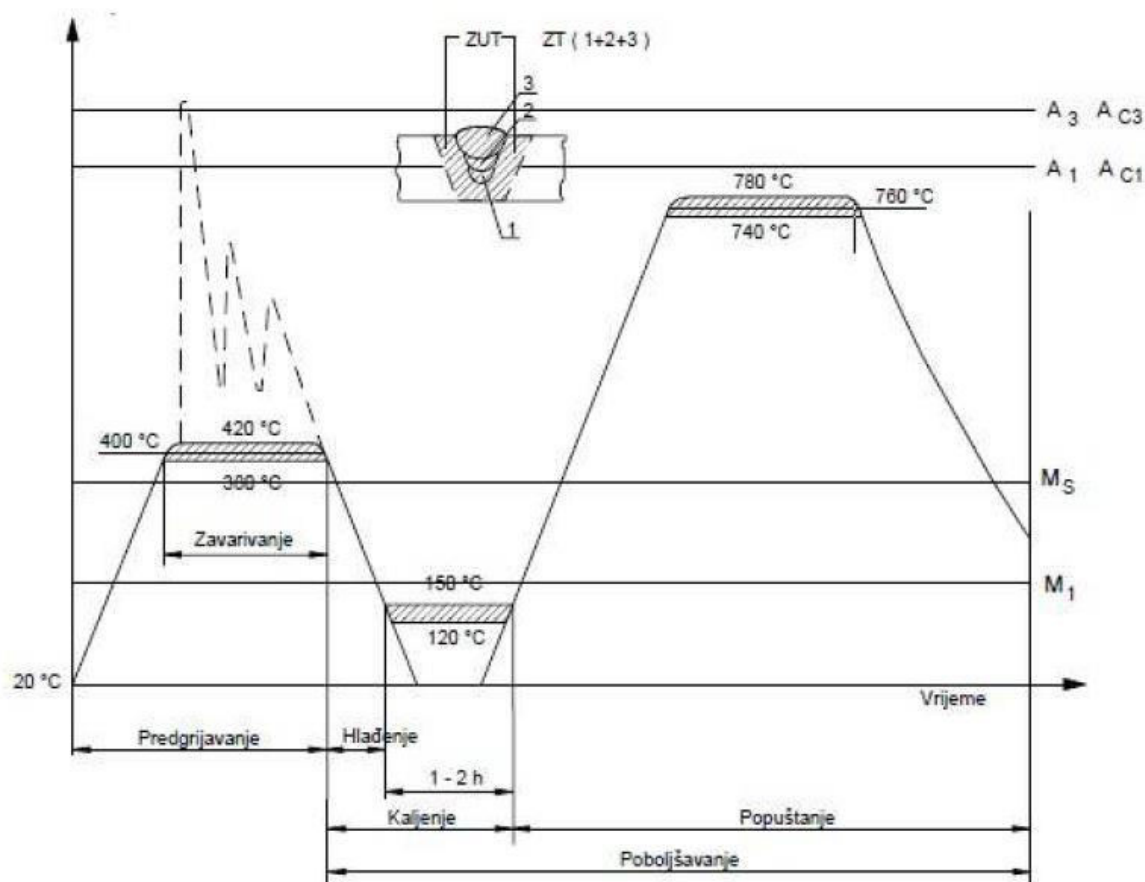
- osjetljivost prema vodikovoj krhkosti posebno u sulfidnim okolišima,
- magnetični su,
- loša otpornost na udarni lom kod sniženih temperatura,
- imaju višu tvrdoću, čvrstoću i otpornost na trošenje u odnosu na feritne i austenitne nehrđajuće čelike,
- mogu se kaliti, jer imaju transformaciju $\gamma \leftrightarrow \alpha$,
- poboljšana granica razvlačenja i otpor puzanju pri povišenim temperaturama,
- najčešće se koriste u poboljšanom stanju,
- ne koriste se na temperaturama višim od 650 °C.

Specifičnosti prilikom zavarivanja martenzitnih nehrđajućih čelika [7]:

- zavarivanje ovih legura zahtjeva postupke toplinske obrade prije postupka zavarivanja (predgrijavanje) i nakon njega (popuštanje),
- česta je pojava hladnih pukotina.

Pri zavarivanju martenzitnih nehrđajućih čelika postoji nekoliko preporučenih toplinskih operacija prikazanih slikom 7. [7]:

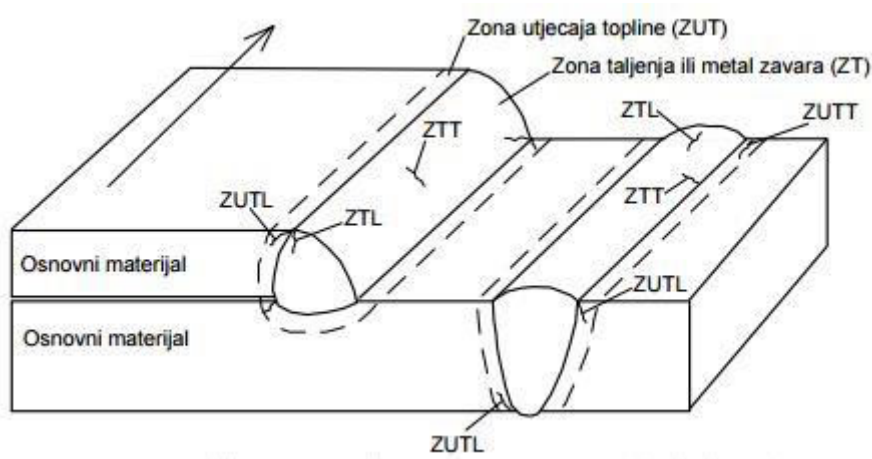
1. Prije samog zavarivanja obavezno je predgrijavanje iznad M_s linije (martenzit start linije) i to u području austenita - npr. $M_s + 50\text{ °C}$, radi smanjivanja vjerojatnosti za pojavu hladnih pukotina.
2. Obavezno je održavanje temperature iznad M_s linije zbog izuzetne sklonosti zakaljivosti (čak i pri hlađenju na zraku).
3. Nakon zavarivanja dolazi do zakaljivanja hlađenjem na mirnom zraku i zbog toga se nakon zavarivanja vrši lagano hlađenje na temperaturu ispod M_f linije (martenzit finish linije) i zadržavanje na toj temperaturi (npr. $M_f - 20\text{ °C}$) 1-2h da bi se sav zaostali austenit transformirao u martenzit.
4. Da bi materijal poprimio stanje osnovnog materijala prije zavarivanja podvrgava ga se još popuštanju tvrdoće na temperaturi ispod A_{c1} i postiže se poboljšano stanje.



Slika 7. Ispravne toplinske operacije pri zavarivanju martenzitnih nehrđajućih čelika [7]

Najčešći, a ujedno i najveći problem kod zavarivanja matrenzitnih čelika je pojava hladnih (vodikovih) pukotina. Hladne pukotine nastaju uslijed prelaska vodika, koji je difundirao u talinu zavora, iz atomarnog stanja u molekularno stanje prilikom hlađenja. Molekule vodika smještaju se u materijalu na mjestima sitnih pogrešaka pri čemu nastaju visoki tlakovi koji dovode do pukotina. Dije se na mikropukotine (nevidljive za oko i mnoga nerazorna ispitivanja) i makropukotine (vidljive golim okom ili se lako otkrivaju nekom od metoda ispitivanja). Mogu nastati na površini zavarenog spoja, ali mogu biti i nevidljive u zavarenom spoju. S obzirom na smjer rasprostiranja dijele se na longitudinalne (L) i transferzalne (T), a mogu se pojaviti i na prijelazu u osnovni materijal [13].

Slikom 8. prikazane su lokacije i orijentacije hladnih pukotina.

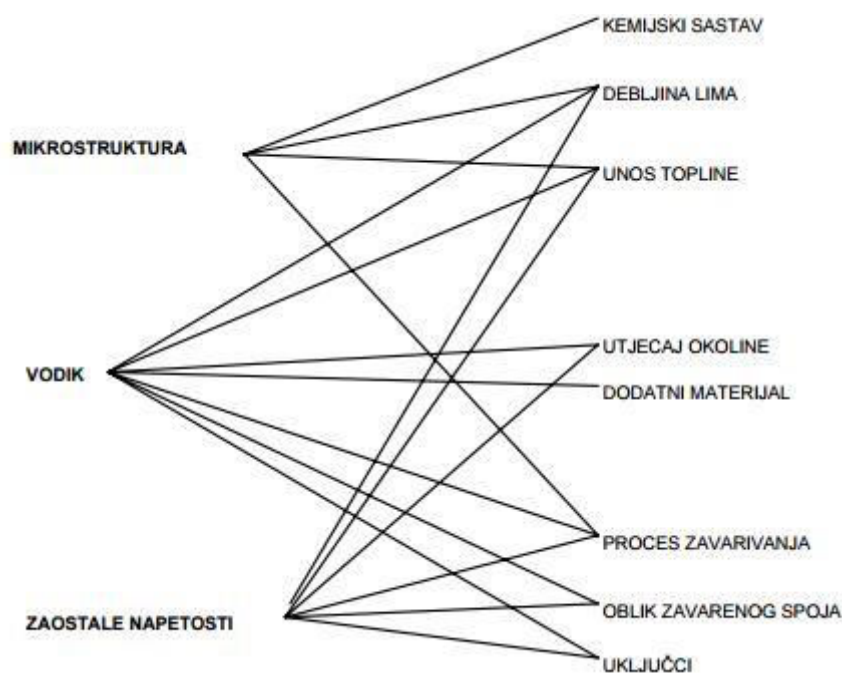


Slika 8. Lokacije i orijentacije hladnih pukotina [13]

Glavni uzročnici nastajanja hladnih pukotina u zavaru su [13]:

- prisustvo vodika u zavaru,
- struktura zavarenog spoja,
- djelovanje naprezanja,
- nepovoljan položaj uključaka u zavaru,
- sklonost materijala zakaljivanju.

Slikom 9. prikazana je shema uzročnika nastajanja hladnih pukotina i njihova povezanost.



Slika 9. Shema uzročnika nastajanja hladnih pukotina [13]

Vodik u zavar dolazi razlaganjem vlage iz obloge elektrode ili iz zaštitnog plina pri visokim temperaturama ili iz nečistoća kao što su hrđa, okujina ili masnoće na površini mjesta zavarivanja [13].

2.2. Zavarljivost visokolegiranih Cr-Ni čelika

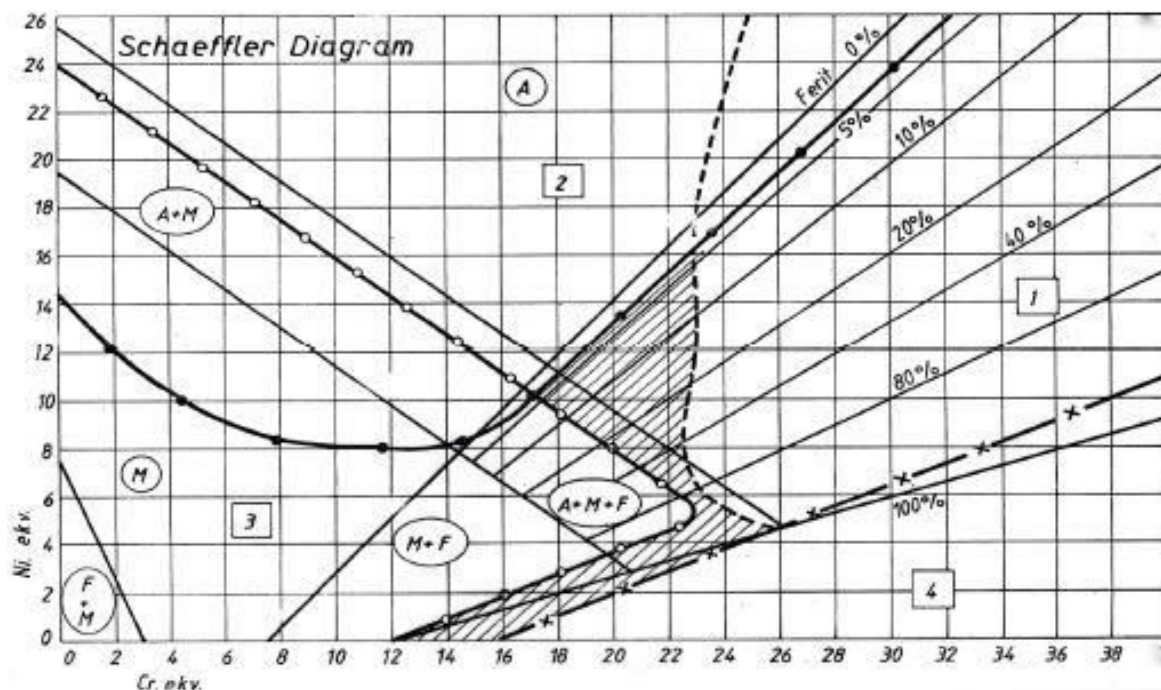
Tehnološka i konstruktivna čvrstoća i pouzdanost proizvoda može se osigurati samo ako nema krhkih međuslojeva u području zavarenog spoja. Zbog toga je neophodno ispravno procijeniti strukturu i svojstva pojedinih zona zavarenog spoja. Uvid u postizivu mikrostrukturu na osnovi kemijskog sastava daje Schaeffler-ov dijagram koji je prikazan na slici 10.. Osim toga, pomaže i u definiranju strukturnog stanja čelika na osnovi poznavanja [14]:

- Cr-ekvivalenta (Cr_{ekv}) koji izražava utjecaj elemenata koji pospješuju stvaranje ferita (tzv. α -geni elementi):

$$Cr_{ekv} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \%Si + 0,5 \%Nb$$

- Ni-ekvivalenta (Ni_{ekv}) koji izražava utjecaj elemenata koji pospješuju stvaranje austenita (tzv. γ -geni elementi):

$$Ni_{ekv} = \%Ni + 30 \%C + 0,5 \%Mn$$



Slika 10. Schaffler-ov dijagram [14]

U Schaffler-ovom dijagramu postoje četiri osnovna strukturna područja koja su razgraničena pravicima i označena početnim slovima naziva strukture koja nastaje [14]:

1. Kod ovog područja na temperaturama od 500 °C do 900 °C dolazi do pojave krhke σ - faze u osnovnom i dodatnom materijalu što rezultira povećanom krhkošću. U austenitno feritnom polju najviše su skloni čelici s više od 10 % δ – ferita (α – faze),
2. Ovo područje obuhvaća uglavnom materijale s austenitnom i djelomice austenitno - martenzitnom strukturom. Iznad 1250 °C materijali su skloni toplim pukotinama. Rješenje za zavarivanje materijala u tom području je korištenje dodatnog materijala koji u strukturi metala zavara osigurava 3 – 10 % ferita,
3. U ovom području nalaze se zavareni spojevi s krhkom martenzitno – austenitnom i martenzitno – feritnom strukturom. Vrlo su skloni pojavi hladnih pukotina ispod 400°C. Predgrijavanjem i naknadnom toplinskom obradom žarenjem može se riješiti problem hladnih pukotina. Ovo područje prekriva i jedan dio područja 2 u prekrštenom dijelu te može doći i do pojave toplih pukotina,
4. Ovo područje obuhvaća veliki dio čistog ferita i djelomično austenita, time i korozijski postojane čelike s vrlo niskim sadržajem ugljika. Iznad 1100 °C dolazi do jakog rasta kristalnog zrna te su posljedice krhkost, znatno smanjenje žilavosti te sklonost pukotinama u području zavara i zone utjecaja topline.

Područje optimalnog sastava zavarenog spoja i dobre zavarljivosti u dijagramu je označeno šrafurom.

Opća pravila za zavarivanje nehrđajućih čelika [5, 7, 9]:

- područje zavara mora biti čisto i glatko obrađeno (bez masnoća, vlage, premaza i drugih nečistoća),
- alati i brusne ploče ne smiju sadržavati karbide (koriste se aluminijski oksidi),
- sredstvo za hlađenje ne smije sadržavati klor,
- pjeskarenje se vrši čistim pijeskom,
- predgrijavanje je obavezno za feritne i martenzitne nehrđajuće čelike,
- vrlo je važan pravilan odabir dodatnog materijala.

3. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE TALJIVOM ELEKTRODOM U ZAŠTITNOJ ATMOSFERI AKTIVNOG PLINA (MAG ZAVARIVANJE)

3.1. Povijest i razvoj MAG postupka zavarivanja

MAG (engl. Metal Active Gas) postupak zavarivanja pojavljuje se 1953. godine u bivšem SSSR-u. Lyubavshkii i Novoshilov zaslužni su za pojavu procesa koji nije bio prihvatljiv jer su zagrijani zaštitni plin (CO_2) i elektrode većeg promjera zahtijevale visoke struje zavarivanja. To je potaklo razvoj boljih struja zavarivanja i elektroda manjih promjera. Posljedica tih istraživanja bio je razvoj prijenosa metala u električnom luku kratkim spojevima koji omogućuje zavarivanje u svim položajima i ubrzo postaje najpopularniji način prijenosa u MAG zavarivanju. Već 1954. godine Bernard razvija postupak zavarivanja praškom punjenom žicom. Postupak je nazvan „Dualshield“ po tome što su u procesu bila dva plina (zaštitni plin i plin koji se razvija izgaranjem praška iz žice). 1959. godine u Lincoln Electric kompaniji proizvedena je žica koja izgaranjem tvori zaštitnu atmosferu i ne zahtijeva dodatnu vanjsku zaštitnu atmosferu plina. Taj proces nazvan je „Innershield“ [15].

Početkom 1960-ih godina razvijen je prijenos metala impulsnim lukom koji prednosti prijenosa metala štrcajućim lukom objedinjuje s nižim unosom topline. Sljedećih godina nastavlja se veliki razvoj MAG zavarivanja impulsnim lukom. Poseban utjecaj u tom razvoju imala je pojava prvih tiristora. Institut za zavarivanje Ujedinjenog Kraljevstva zaslužan je za razvoj algoritma koji pokazuje linearnu povezanost frekvencije impulsnog luka i brzine dovođenja žice koji dovodi do razvoja izvora struje koji kontroliraju frekvenciju impulsa u odnosu na brzinu žice i istu korigiraju u odnosu na povećanje ili smanjenje brzine žice [2].

U današnje vrijeme razvija se sve više postupaka temeljenih na MAG postupku uz određene nadogradnje. Cilj i rezultat su im razna poboljšanja (veća brzina, veća produktivnost, manji utrošak energije,...). Najvažniji suvremeni MAG postupci zavarivanja su:

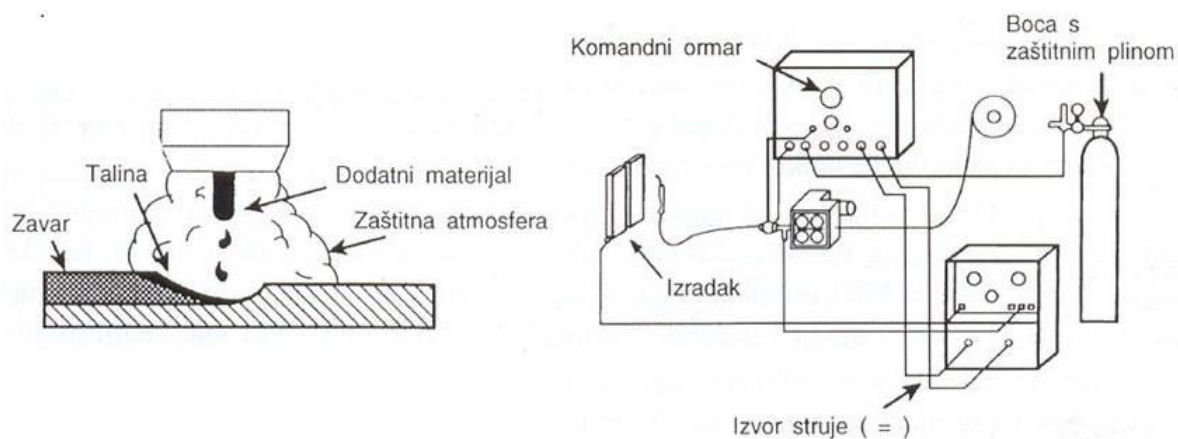
- STT (Surface Tension Transfer) - postupak koji koristi mehanizam površinske napetosti za preciznu regulaciju odvajanja rastaljene kapljice. Kada se ostvare uvjeti za prijenos rastaljenog metala samo uz djelovanje površinske napetosti zaustavlja se porast struje u kratkom spoju čime se sprječava rasprskavanje kapljice rastaljenog metala i maksimizira utjecaj površinske napetosti. Nakon odvajanja kapljice slijedi strujni impuls koji zagrijava vrh žice i priprema ga za novi ciklus

odvajanja kapljice. Rezultat procesa je vrlo nizak unos energije uz eliminaciju štrcanja [16].

- RMT (Rapid MIG/MAG Technology) - postupak koji se bazira na štrcajućem prijenosu materijala. Kod RMT MAG postupka prijenos metala odvija se sitnim kapljicama pri frekvenciji od 2 - 3 kHz što sužava jezgru luka, snižava napon i visinu luka. Posljedica toga je veća koncentracija energije i intenzivnija penetracija [16].
- MAG zavarivanje s dvije žice - postupak koji omogućuje velike brzine zavarivanja uz velike količine rastaljenog metala. Koriste se dva izvora struje, dva sustava za dobavu žice i kontrolna jedinica. Rezultat toga su veće brzine zavarivanja na tankim materijalima u odnosu na konvencionalni MAG postupak zavarivanja. Moguće je kombinirati način prijenosa metala u električnom luku (na jednoj žici može biti impulsni, a na drugoj štrcajući prijenos metala, a isto tako na obje može biti ili impulsni ili štrcajući prijenos metala ovisno o zahtjevima) [2].

3.2. Općenito o MAG postupku zavarivanja

Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina ili skraćeno MAG (proces taljenja i shema uređaja prikazani su slikom 11.) je postupak zavarivanja taljenjem, gdje se električni luk uspostavlja i održava između kontinuirane, taljive elektrode (žice) i radnog komada. Prema normi *HRN EN ISO 4063:2012 Zavarivanje i srodni postupci - Nomenklatura postupaka i referentni brojevi označava se oznakom 135*.



Slika 11. Shematski prikaz MAG zavarivanja [17]

Aktivni zaštitni plin koji se koristi u procesu je CO_2 ili neka njegova mješavina s argonom, helijem ili kisikom, a njegova zadaća je zaštititi električni luk i rastaljeni metal od negativnog utjecaja okoline i ionizirati vodljivi prostor za održavanje električnog luka. Električni luk je

snažno i trajno pražnjenje u ionizirajućem plinu između radnog komada i elektrode u obliku žice, koja je u pravilu spojena na „+“ pol istosmjernog (DC) izvora struje, u strujnom krugu. Proces se odvija tako da pogonski sistem konstantnom brzinom dodaje žicu u električni luk kroz cijevni paket i pištolj. Pri zavarivanju na udaljenosti većoj od 5 m od izvora struje potrebno je koristiti dodatni pogon za dodavanje žice smješten u samom pištolju da bi se smanjio rizik gužvanja žice unutar cijevnog vodiča. Taj sistem naziva se „push-pull“, a koristi se i na manjim udaljenostima u slučaju rada sa žicama manjeg promjera (0,6 - 0,8 mm). Žica istovremeno obavlja zadaću elektrode i dodatnog materijala, odnosno njenim taljenjem popunjava se unaprijed pripremljeni žlijeb. MAG postupak lako je automatizirati i danas, ovisno o potrebi, postoji izbor između poluautomatskog (dodavanje žice je mehanizirano, a vođenje pištolja ručno), automatskog (glava pištolja pokretana je automatskim mehanizmom, a radni komad je nepomičan ili obratno) ili robotiziranog sustava za MAG zavarivanje [17, 18].

Prednosti MAG postupka zavarivanja [17]:

- postupak je primjenjiv za zavarivanje gotovo svih vrsta materijala,
- veliki izbor parametara zavarivanja,
- veliki izbor načina prijenosa metala,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima,
- mogućnost zavarivanja u radionici i na terenu,
- mogućnost primjene raznih plinskih mješavina,
- mogućnost primjene praškom punjene žice,
- širok raspon debljine materijala,
- velika učinkovitost i proizvodnost,
- moguća primjena za lemljenje,
- pogodnost za automatizaciju.

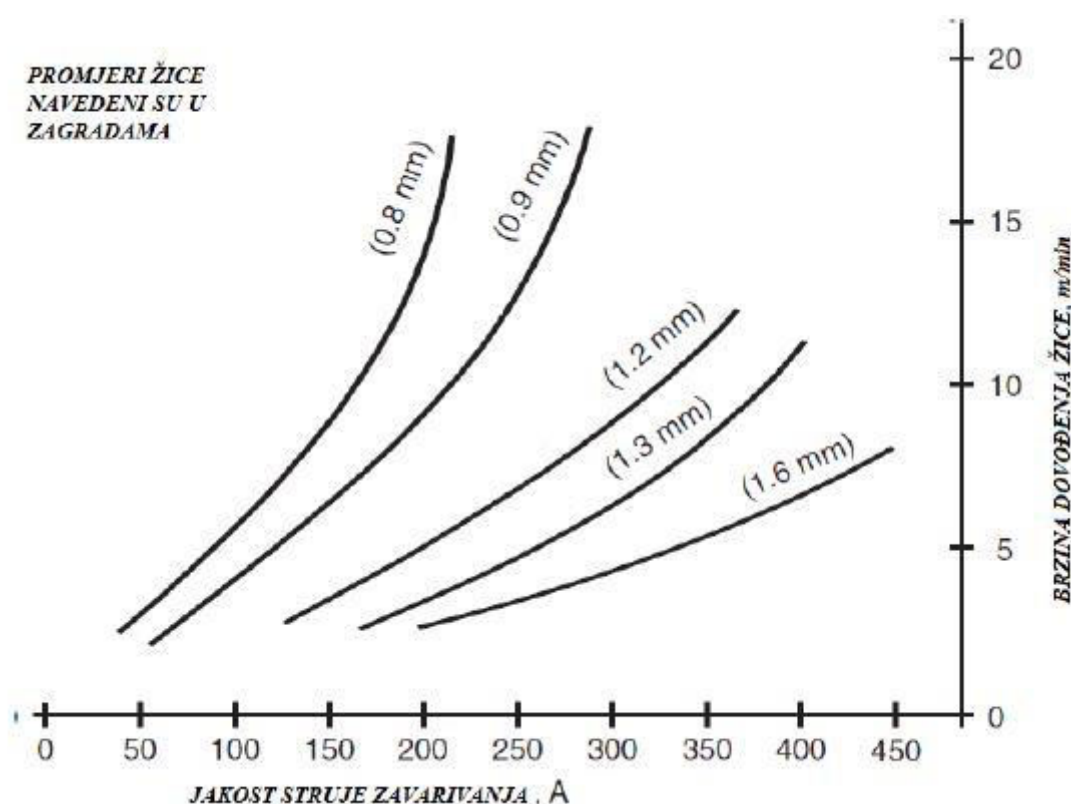
Nedostaci MAG postupka zavarivanja [17]:

- otežana zaštita plinskom atmosferom na terenu,
- problemi pri dovođenju žice,
- greške uslijed neodgovarajuće tehnike i loše izabranih parametara zavarivanja,
- pojava štrcanja prilikom zavarivanja kratkim spojevima,
- relativno složen uređaj.

3.2.1. Osnovni parametri MAG zavarivanja

Najutjecajniji čimbenici o kojima ovisi kvaliteta zavarenog spoja nakon zavarivanja MAG postupkom zavarivanja nazivaju se parametri zavarivanja. Najvažniji parametri zavarivanja kod MAG postupka zavarivanja su [19]:

- jakost struje - o jakosti struje ovise način na koji će se rastaljeni metal prenositi u električnom luku, stabilnost električnog luka, penetracija, količina taljevine i brzina zavarivanja. Sama jakost struje ovisi, odnosno određuje se prema promjeru žice, položaju zavarivanja i vrsti i debljini materijala, a razlikuje se i za različite načine prijenosa metala u električnom luku. Na slici 12. prikazana je ovisnost jakosti struje o promjeru žice i brzini zavarivanja [2, 19].

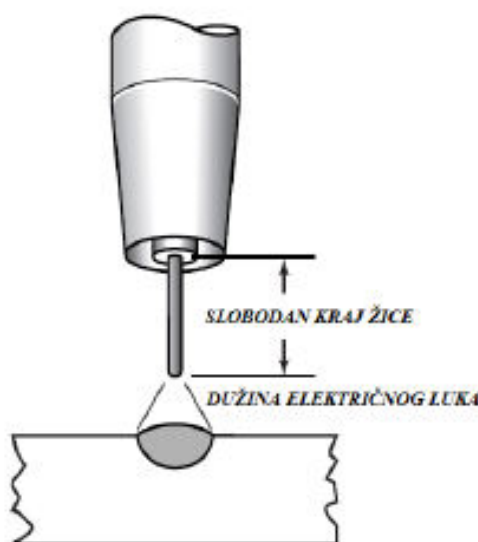


Slika 12. Ovisnost jakosti struje o promjeru žice i brzini zavarivanja [2]

- brzina zavarivanja - parametar o kojem ovisi produktivnost postupka zavarivanja i zbog toga ga treba pažljivo i pravilno odabrati. Odabir brzine zavarivanja ovisi o položaju zavarivanja i jakosti struje zavarivanja (ovisnost brzine zavarivanja o jakosti struje zavarivanja prikazana je na slici 12.). Izgled profila zavora direktno ovisi o brzini zavarivanja (povećanjem brzine zavarivanja zavar postaje uži, a

penetracija manja, a smanjenjem brzine zavarivanja zavar postaje širi, a penetracija veća) [2, 17].

- slobodni kraj žice - slobodnim krajem žice naziva se dio žice od kraja kontaktne vodilice do početka električnog luka (dio koji je vidljiv zavarivaču) i njegova promjena utječe na jakost struje u električnom luku. Povećanjem slobodnog kraja žice povećava se otpor protoku struje što uzrokuje pad jakosti struje zavarivanja, a smanjenjem slobodnog kraja žice smanjuje se otpor protoku struje i dolazi do porasta jakosti struje zavarivanja. Da bi se održala konstantna vrijednost penetracije potrebno je slobodni kraj žice održavati konstantnim i izbjegavati njegovo smanjenje ili povećanje. Na slici 13. definiran je slobodni kraj žice [2].



Slika 13. Slobodni kraj žice [2]

- napon - stabilnost električnog luka te njegova duljina i širina direktno ovise o naponu. Veći napon uzrokuje duži električni luk čime se dobiva širi zavar uz manju penetraciju. Iznos napona drugačiji je za različite načine prijenosa metala. Odnos napona i jakosti struje reguliraju sami uređaji što znači da je potrebno unesti samo jedan od ova dva parametra. Pri reguliranju odnosa napona i jakosti struje koriste ravnu karakteristiku [2, 17].
- induktivitet - induktivitet može biti fiksno podešen (optimalni nivo induktiviteta ugrađen je u izvor struje za zavarivanje), a može se i mijenjati (količina induktiviteta primijenjenog na električni luk može se podesiti). Najveći utjecaj ima

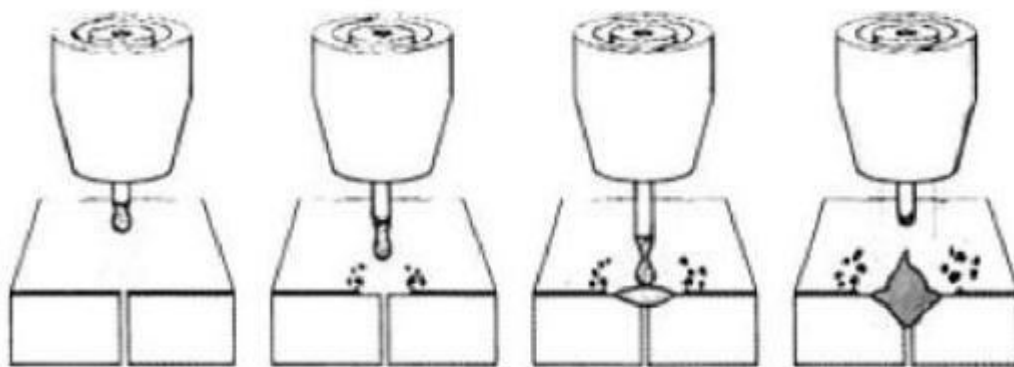
kod prijenosa metala kratkim spojevima (povećanjem induktiviteta smanjuje se frekvencija kapljica, a njegovim smanjenjem frekvencija kapljica se povećava) [2].

- protok zaštitnog plina - parametar koji ima veliki utjecaj na oblik profila zavora (širinu i penetraciju), brzinu zavarivanja i stabilnost električnog luka. Zadaća zaštitnog plina je čuvati područje zavora od negativnog utjecaja plinova iz atmosfere. Protok zaštitnog plina regulira se u odnosu na jakost struje zavarivanja, uvjete u kojima se vrši zavarivanje i karakteristike spoja koji se zavaruje. Za veću struju zavarivanja potreban je i veći protok zaštitnog plina [2, 17].

3.2.2. Načini prijenosa metala u električnom luku

Način prijenosa metala u električnom luku može biti slobodnim letom ili premošćivanjem, a ovisi o naponu i jakosti struje, vrsti zaštitnog plina, polaritetu i dodatnom materijalu. Kod MAG postupka zavarivanja razlikuju se četiri načina prijenosa metala u električnom luku [2, 18]:

- 1) kratkim spojevima - prijenos metala kod kojeg se kontinuirano dobavljana žica tali uslijed kratkih spojeva. Karakteristika prijenosa metala kratkim spojevima je mali unos topline, a najveći utjecaj na uspješnost izvođenja imaju promjer elektrode i vrsta zaštitnog plina. Karakteristične vrijednosti napona (13 - 21 V) i jakosti struje zavarivanja (50 - 170 A) manje su od napona i jakosti struje zavarivanja kod ostalih načina prijenosa metala. Pri stabilnim parametrima u sekundi se dogodi između 100 i 200 kratkih spojeva. Na slici 14. prikazane su faze impulsa pri prijenosu materijala kratkim spojevima.

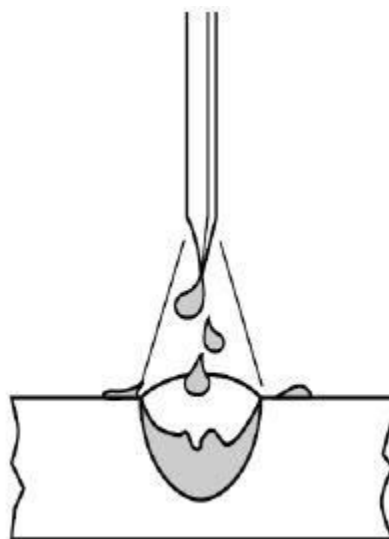


Slika 14. Prijenos metala kratkim spojevima - faze impulsa [20]

Ovaj prijenos metala pogodan je za zavarivanje tanjih materijala (0,6 - 5,0 mm) zbog malog unosa topline i često se koristi za zavarivanje korijena kod cjevovoda.

Debljine elektroda koje se koriste pri zavarivanju kratkim spojevima kreću se između 0,6 mm i 1,2 mm. Plinovi koji se najčešće koriste su 100 %CO₂, mješavina 75-80 %Ar sa 20-25 %CO₂, a manje se koriste mješavine argona i O₂ i posebne mješavine argona, CO₂ i O₂. Prednosti ovog načina prijenosa metala su: mogućnost zavarivanja u svim položajima, dobro podnosi greške u pripremi zavara, manje su deformacije zavara zbog manjeg unosa topline, iskoristivost elektrode je više od 93%. Nedostaci su: potrebno je zaštititi područje zavarivanja od vjetra kod rada na terenu, uslijed lošeg vođenja procesa dolazi do štrcanja i nedovoljnog protaljivanja, pogodan samo za tanje materijale [2, 18].

- 2) prijelaznim lukom - prijenos metala kod kojeg se kontinuirano dobavljana žica tali uslijed kombiniranog djelovanja kratkih spojeva i načina prijenosa metala štrcajućim lukom. Karakteristične vrijednosti napona (22 - 25 V) i jakosti struje zavarivanja (170 - 235 A) nešto su veće nego kod prijenosa metala kratkim spojevima što uzrokuje veće, nepravilno oblikovane kapljice (promjer im je veći od promjera elektrode). Slikom 15. prikazan je prijenos metala prijelaznim lukom.

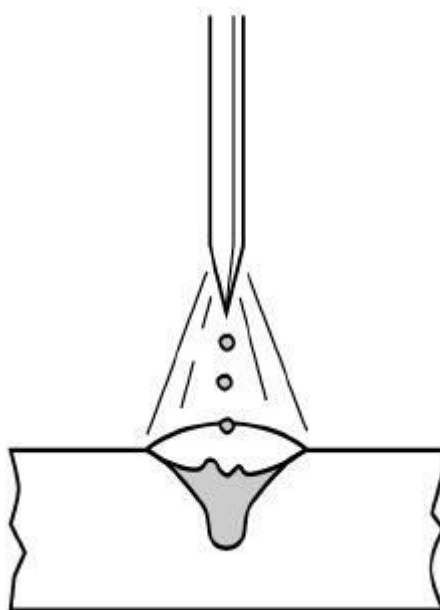


Slika 15. Prijenos metala prijelaznim lukom [2]

Najčešće korišteni zaštitni plin je 100 %CO₂, a moguće je koristiti i mješavinu argona i CO₂. U današnje vrijeme način prijenosa metala prijelaznim lukom potpuno je istisnut iz upotrebe zbog problema s nestabilnosti procesa uslijed izmjenjivanja načina prijenosa metala kratkim spojevima i štrcajućim lukom. Prednosti ovog načina prijenosa metala su: jeftiniji zaštitni plin, mogućnost zavarivanja velikim brzinama, jeftina oprema za zavarivanje i jeftin dodatni

materijal. Nedostaci su: potreba za skupom naknadnom obradom nakon zavarivanja zbog jakog prskanja koje karakterizira ovaj način prijenosa metala i manja iskorištenost elektrode u odnosu na ostale postupke [2, 18].

- 3) štrcajućim lukom - prijenos metala čija je karakteristika veliki unos topline uslijed koje se tali kontinuirano dobavljana žica. Talina u obliku malih kapljica slobodnim letom putuje električnim lukom, a elektroda pritom ne dodiruje radni komad. Karakteristične vrijednosti napona (25 - 40 V) i jakosti struje zavarivanja (200 - 600 A) veće su u odnosu za iznad opisane načine prijenosa metala. Slikom 16. prikazan je prijenos metala štrcajućim lukom.

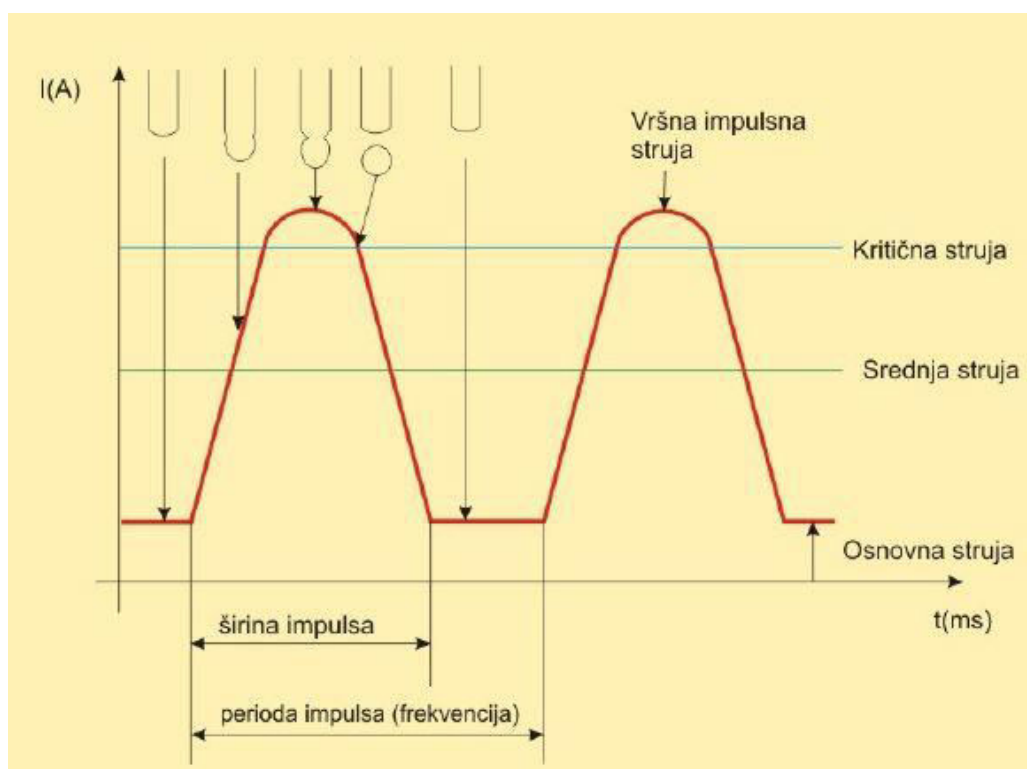


Slika 16. Prijenos metala štrcajućim lukom [2]

Zaštitni plinovi koji se koriste su mješavina argona i 1,5 %O₂ i mješavina argona i CO₂ kod koje mora biti manje od 18 %CO₂. Ovaj načina prijenosa metala koristi se za zavarivanje ugljičnih čelika, visokolegiranih čelika i legura nikla. Prednosti ovog načina prijenosa metala su: ne zahtjeva naknadno čišćenje jer nema prskanja, omogućava veliki depozit uz veliku iskorištenost elektrode (više od 98%), korištenje širokog spektra dodatnih materijala i raspona promjera žice te ga je vrlo lako automatizirati. Nedostaci su: mogućnost primjene samo na debljim materijalima, nemogućnost zavarivanja u svim položajima i skuplji zaštitni plinovi u odnosu na iznad opisane načine prijenosa metala [2, 18].

- 4) impulsnim lukom - način prijenosa metala koji se može nazvati i visoko kontrolirana verzija štrcajućeg luka. Izvor struje generira promjenjiv oblik struje

zvan impuls. Jakost struje u jednom impulsu mijenja se od vršne vrijednosti (maksimalna vrijednost jakosti struje) do vrijednosti osnovne struje. U trenutku kada iznos struje dosegne vršnu vrijednost impulsne struje odvaja se jedna kapljica dodatnog materijala koja slobodnim letom putuje duž električnog luka. Nakon odvajanja samo jedne kapljice vrijednost struje pada na osnovnu vrijednost koja osigurava stabilnost električnog luka i srednju vrijednost unosa topline. Srednja struja zavarivanja regulira se kombinacijom frekvencije impulsnog zavarivanja (koja proporcionalno raste s brzinom dovođenja žice) i brzinom dovođenja žice. Zavarivanjem impulsnim lukom moguću je zavarivati široki spektar debljine osnovnog materijala. Oblik impulsa ovisi o načinu proizvodnje i može biti sinusoidalni (najjednostavnije ga je proizvesti), trokutasti ili četvrtasti (najpovoljniji za upravljanje procesom). Na slici 17. prikazana je ovisnost struje zavarivanja o vremenu pri prijenosu metala impulsnim lukom.



Slika 17. Prijenos metala impulsnim lukom - promjena struje zavarivanja ovisno o vremenu [21]

Podešavanje parametara kod ovog načina prijenosa metala prilično je komplicirano i složeno jer treba uskladiti pet osnovnih parametara: vrijednost osnovne struje (služi za onemogućavanje gašenja luka nakon prestanka impulsa i podešava se na što manju vrijednost, najčešće se kreće u granicama između 20 i 50 A), vrijednost

vršne struje (određuje se prema vrsti osnovnog materijala, promjeru žice i mješavini zaštitnog plina, najčešće u granicama između 250 i 650 A), širina impulsa (odabire se tako da omogući odvajanje samo jedne kapljice tijekom trajanja impulsa, najčešće u granicama između 1 i 3 ms), frekvencija (parametar koji predstavlja broj kapljica u sekundi i odabire se tako da kod određene brzine žice odvajanje kapljica bude stabilno, najčešće u području između 20 i 300 Hz) i brzina dodavanja žice (parametar kojem je podređeno podešavanje svih ostalih parametara i kojim se određuje količina rastaljenog metala, ovisi o promjeru žice i kreće u granicama između 2 i 15 m/min) i to u današnje vrijeme obavljaju elektronički programirani uređaji (za jednu izabranu vodeću veličinu biraju optimalnu kombinaciju ostalih parametara). Dodatni materijali koji se najčešće koriste su pune elektrode (promjera od 0,8 mm do 1,6 mm) i praškom punjene elektrode (promjera od 1,2 mm do 2,0 mm), a zaštitni plinovi u kojima se postiže način prijenosa metala impulsnim lukom su plinske mješavine bogate argonom (kod ugljičnih čelika mogu se koristiti i plinske mješavine s maksimalno 18 %CO₂). Prednosti ovog načina prijenosa metala: mogućnost primjene u svim položajima zavarivanja i za materijale osjetljive na količinu unesene topline (manji unos topline), moguće je istim promjerom žice zavarivati širi raspon debljine materijala, vrlo malo prskanja, mogućnost automatiziranja, mogućnost postizanja velikih brzina zavarivanja i velika iskorištenost elektrode. Nedostaci su: skupa oprema, skupe zaštitne plinske mješavine i potrebna dodatna zaštita zavarivača (veća energija električnog luka) [2, 18, 21].

3.3. Dodatni materijali za MAG zavarivanje visokolegiranih Cr-Ni čelika

Kao dodatni materijal pri MAG zavarivanju najčešće se koriste pune žice promjera od 0,6 do 2,4 mm. Žice su obično pobakrene ili poniklane s ciljem boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije. Dimenzije žice moraju biti vrlo točne i žica treba biti uredno namotana na kolut koji se postavlja u uređaj za dodavanje. Osim punih žica koriste se još i praškom punjene žice raznih presjeka. Pri zavarivanju nehrđajućih čelika dodatni materijal odabire se na temelju osnovnog materijala kojem mora imati što sličniju mikrostrukturu [18].

3.4. Zaštitni plinovi za MAG zavarivanje visokolegiranih Cr-Ni čelika

Pravilan odabir zaštitnog plina ima ključnu ulogu u kvaliteti zavarenog spoja jer bitno utječe na njegova mehanička i metalurška svojstva. Zaštitni plin se odabire na temelju mnogo kriterija od kojih su najbitniji [2]:

- vrsta dodatnog materijala,
- debljina osnovnog materijala,
- željena mehanička svojstva zavarenog spoja,
- priprema zavora,
- stanje osnovnog materijala,
- željeni način prijenosa materijala u električnom luku,
- položaj zavarivanja,
- željeni profil zavora.

Osnovna tri parametra za razumijevanje svojstava zaštitnih plinova su [2]:

- ionizacijski potencijal - energija koja je dovoljna da izolirani atom ili molekula u plinovitom stanju izgube jedan elektron, pri čemu nastaje ionski par (pozitivno nabijeni ion i izbačeni elektron). Može se definirati i kao mjera sposobnosti kemijskog elementa da ulazi u kemijske reakcije uz stvaranje iona.
- toplinska vodljivost - fizikalna veličina određena kao količina topline u jedinici vremena. Toplinska vodljivost tvari jednaka je količini topline koju provodi kroz jedinicu površine, u jedinici vremena, pri standardnim uvjetima, a da se pritom vrijednost temperature smanji za jedan stupanj (1 K) na jedinici puta u smjeru strujanja topline.
- reaktivnost plina - tendencija plina da kemijski reagira s drugim tvarima ili sam sa sobom, pritom oslobađajući energiju. Plinovi se dijele na inertne (ne reagiraju s talinom zavora) i aktivne (reagiraju s talinom zavora, sudjeluju u procesu).

Najčešće korišteni zaštitni plinovi za MAG zavarivanje su: ugljični dioksid (CO_2) i razne mješavine (dvokomponentne i trokomponentne) ugljičnog dioksida (CO_2), argona (Ar), kisika (O_2) i helija (He), a u malim postocima mogu se pojaviti i vodik (H_2) i dušik (N_2) [17].

Najvažnija svojstva plinova koji se koriste u MAG zavarivanju su [2]:

- argon (Ar) - inertni plin. Posljedice niske energije ionizacije argona su lakše paljenje luka i specifičan oblik zavora u obliku „prsta“. Argon je najvažniji sastojak plinskih mješavina za MAG zavarivanje.

- ugljični dioksid (CO_2) - plin koji je pri sobnoj temperaturi inertan, a u električnom luku postaje aktivan. Povećanje udjela ovog plina u mješavini ima nekoliko posljedica: povećanje iznosa kritične struje zavarivanja, smanjenje stabilnosti luka, povećanje štrcanja i gubitak metala. Mješavina s argonom gdje je ugljični dioksid u manjem omjeru poboljšava stabilnost luka i smanjuje kritičnu struju zavarivanja.
- helij (He) - plin koji ima visoku toplinsku vodljivost. Posljedica toga je širi profil zavora uz manju penetraciju.
- kisik (O_2) - koristi se u manjim količinama (1-5%) u mješavini sa argonom čime se dobiva dobra stabilnost luka i estetski odličan zavar.
- vodik (H_2) - koristi se u manjim količinama (1-5%) u mješavini s argonom gdje služi kao zaštitni plin pri zavarivanju austenitnih nehrđajućih čelika i legura nikla. Vodikova velika toplinska vodljivost poboljšava kvašenje i omogućuje veće brzine zavarivanja.

Pri MAG zavarivanju nehrđajućih čelika impulsnim lukom kao zaštitni plinovi najčešće se koriste mješavine iznad navedenih plinova i to [2]:

- dvokomponentne mješavine od kojih su najčešće mješavine Ar i CO_2 gdje je udio CO_2 manji od 4%,
- trokomponentne mješavine od kojih su najčešće mješavine He, Ar i CO_2 u raznim omjerima.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

U svrhu kvantificiranja utjecaja zaštitnog plina na svojstva i geometriju zavarenog spoja za eksperimentalni dio završnog rada izrađena su dva ispitna uzorka. Zavarivanje uzoraka, izrezivanje ispitnih uzoraka i priprema makroizbrusaka presjeka zavara rađeni su na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za zavarivanje. Izrađeni su makroizbrusci presjeka dva kutna zavarena spoja zavarivanih pod zaštitom različitih zaštitnih plinova. Nagrizanje makroizbrusaka ispitnih uzoraka izvedeno je u Laboratoriju za zaštitu materijala.

4.1. Oprema i materijali korišteni za izradu eksperimentalnog dijela rada

4.1.1. Oprema za zavarivanje

Za izradu zavarenih uzoraka eksperimentalnog dijela korišten je izvor struje Welbee Inverter P400 proizvođača Daihen Varstroj koji je prikazan na slici 18., a njegove tehničke specifikacije navedene su u tablici 1.

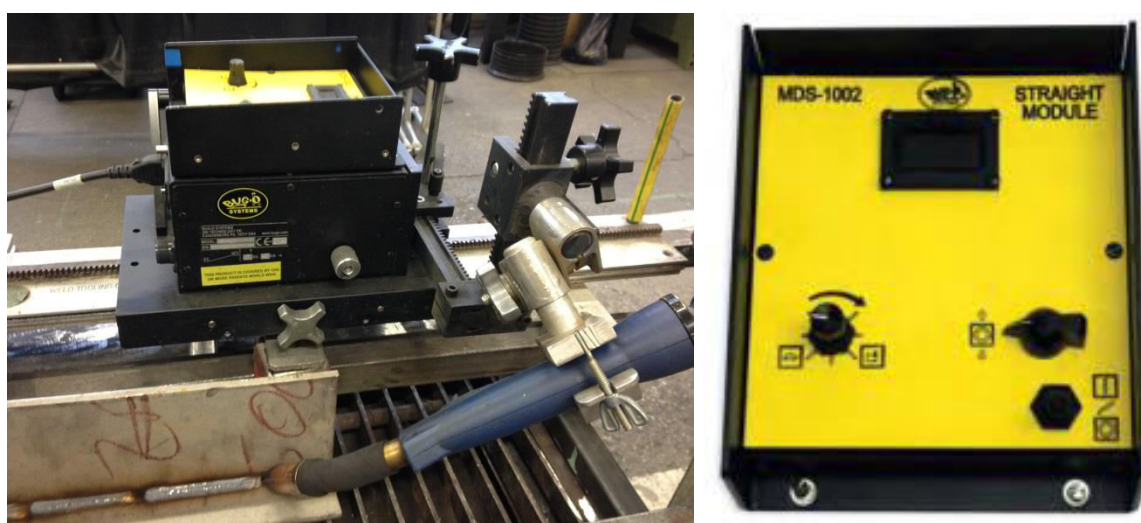


Slika 18. Izvor struje za zavarivanje Welbee Inverter P400

Tablica 1. Tehničke specifikacije izvora struje za zavarivanje Welbee Inverter P400

Raspon struje za MIG/MAG [A]	30 - 400
Raspon napona za MIG/MAG [V]	12 - 34
Nazivna frekvencija [Hz]	50/60
Dimenzije v/d/š [mm]	710 x 592 x 395
Masa [kg]	62

Za automatsko kretanje pištolja korišten je automat MDS-1002 (modularni sustav vožnje) proizvođača Bug-o Systems prikazan na slici 19..



Slika 19. Sustav za automatsko pokretanje pištolja za zavarivanje

4.1.2. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal korišten je austenitni nehrđajući čelik oznake X5CrNiMo17-12-2 češće označavan po američkom standardu (316). U tablici 2. prikazan je kemijski sastav osnovnog materijala, a u tablici 3. njegova mehanička svojstva.

Tablica 2. Kemijski sastav čelika X5CrNiMo17-12-2

Kemijski element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N
Maseni udio elementa, %	0,07	2	0,045	0,015	1	16,5-18,5	10-13	2-2,5	0,11

Tablica 3. Mehanička svojstva čelika X5CrNiMo17-12-2

Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	Granica razvlačenja [N/mm ²]	Istezljivost [%]	Suženje [%]
480	170	40	50

U eksperimentalnom dijelu rada korištene su dvije ploče osnovnog materijala dimenzija:

- duljina - 350 mm,
- širina - 150 mm,
- visina - 150 mm,
- debljina - 8 mm.

4.1.3. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal za izradu uzoraka korištena je žica 316L. U tablici 4. iznesena su mehanička svojstva dodatnog materijala, a u tablici 5. kemijski sastav dodatnog materijala.

Tablica 4. Mehanička svojstva dodatnog materijala 316L

Promjer žice [mm]	Granica razvlačenja [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	Istezanje [%]	Udarni rad loma pri 20 °C [KV/J]
1,2	>320	>510	>25	≥80

Tablica 5. Kemijski sastav dodatnog materijala 316L

Kemijski element	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
Maseni udio elementa, %	≤0,03	1,7	0,8	18,5	12,0	2,6

4.1.4. Zaštitni plin

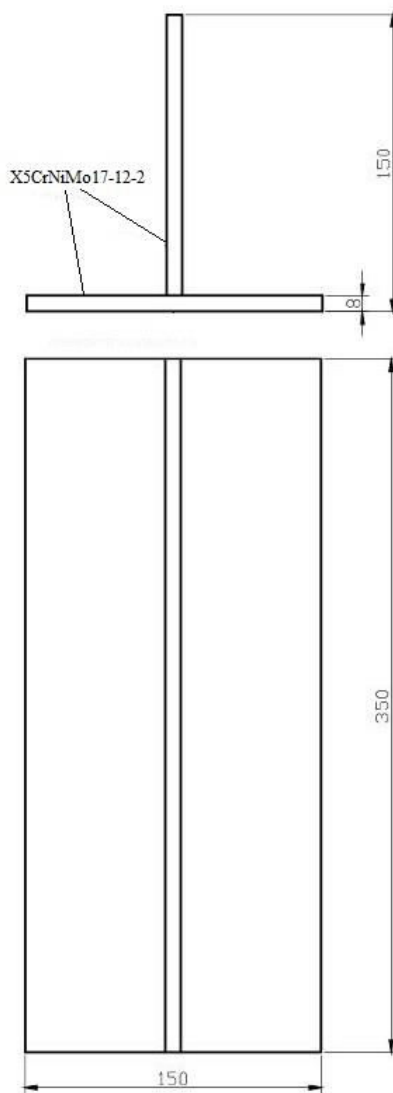
U eksperimentalnom dijelu završnog rada korištene su dvije vrste zaštitnog plina. Posebna pažnja posvetila se njihovom utjecaju na geometriju zavara i količinu unesene topline. Korišteni plinovi su:

- Inoxline C2 sastava 97,5 %Ar i 2,5 %CO₂ (gustoća plina pri 0 °C i 1,013 bara iznosi 1,79 kg/m³),
- Inoxline X3 sastava 97 %Ar i 3 %O₂ (gustoća plina pri 0 °C i 1,013 bara iznosi 1,78 kg/m³).

4.2. Priprema spoja

Prije samog zavarivanja potrebno je pripremiti spoj. Ploče su detaljno očišćene od masnoće i nečistoća alkoholnom otopinom. Za eksperimentalni dio završnog rada pripremljen je kutni spoj. Na pločama nisu rađene dorade (nema skošenja) i postavljene su tako da nema zračnosti između njih.

Na slici 20. prikazan je ispitni uzorak spreman za zavarivanje u nacrtu i tlocrtu.



Slika 20. Prikaz dimenzija pripremljenog spoja

4.3. Parametri zavarivanja

Ispitni uzorci zavarivani su MAG postupkom uz zaštitu različitih mješavina zaštitnog plina.

Važan podatak za zavarivanje je i unos topline koji se izračunava prema formuli:

$$Q = \frac{U \times I \times 60}{v_z \times 1000} \times \eta \text{ [kJ/cm]}$$

U - napon zavarivanja [V]

I - jakost struje zavarivanja [A]

v_z - brzina zavarivanja [cm/min]

η - stupanj iskorištenja koji ovisi o postupku zavarivanja (za MAG 0,8)

Prije zavarivanja uzoraka korištenih za daljnja ispitivanja (u daljnjem tekstu nazvanih uzorak „A“ i uzorak „B“) zavareno je nekoliko probnih zavara u svrhu optimiziranja parametara radi dobivanja tražene visine zavara od 5,5 mm. Kod svih zavarivanja protok plina iznosio je 17 l/min, korištena je desna tehnika zavarivanja uz pištolj nagnut pod 45°, a slobodni kraj žice iznosio je 18 mm. Parametri probnih zavarivanja usporedno su prikazani u tablici 6.

Tablica 6. Usporedni prikaz parametara probnih zavarivanja

Parametri zavarivanja	Proba 1	Proba 2	Proba 3
Zaštitni plin	Inoxline C2 (97,5 %Ar + 2,5 %CO ₂)	Inoxline C2 (97,5 %Ar + 2,5 %CO ₂)	Inoxline X3 (97 %Ar + 3 %O ₂)
Brzina zavarivanja [cm/min]	25	35	32
Nominalna jakost struje [A]	220	220	220
Očitana jakost struje [A]	262	247	260
Nominalni napon [V]	23,5	23,5	25,6
Očitani napon [V]	19,4	20,4	25,2
Brzina dodavanja žice [m/min]	9	9	8,5
Unos topline [kJ/cm]	9,76	6,91	9,83

Na slici 21. prikazani su izgledi probnih zavora uz koje je postavljena jednostavna mjerka za mjerenje visine zavora.



a) Proba 1

b) Proba 2

c) Proba 3

Slika 21. Usporedni prikaz izgleda probnih zavora

Nakon optimiziranja parametara krenulo se na zavarivanje ispitnih uzoraka.

4.3.1. Uzorak „A“

Za zavarivanje ispitnog uzorka „A“ kao zaštitni plin korišten je Messer Inoxline C2 sastava 97,5% Ar i 2,5% CO₂. Na izvoru struje za zavarivanje odabran je program impulsnog zavarivanja nehrđajućih čelika u zaštiti navedenog plina koji po sinergiji predlaže ostale parametre za zavarivanje nakon unosa jednog od parametara (nominalne jakosti struje ili brzine dodavanja žice). Očitana jakost struje i očitani napon određuju se praćenjem promjena jakosti struje i napona tijekom samog procesa zavarivanja.

Parametri zavarivanja uzorka „A“ navedeni su u tablici 7., a na slici 22. prikazano je sučelje izvora struje za zavarivanje nakon unosa parametara i odabira programa za zavarivanje.

Tablica 7. Parametri pri zavarivanju ispitnog uzorka „A“

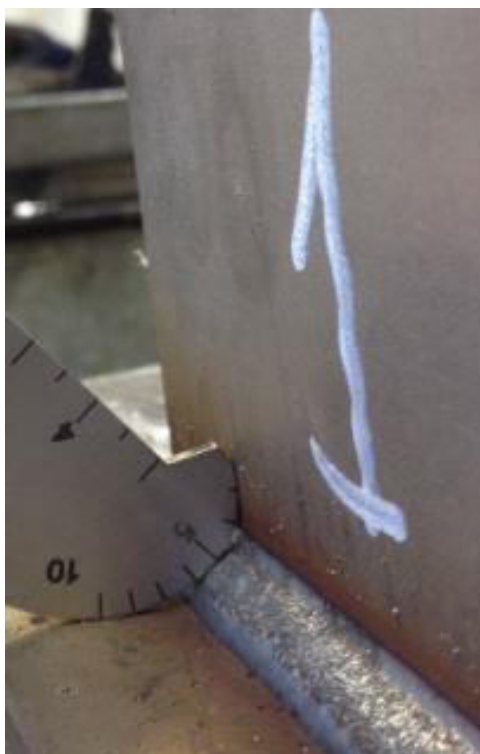
Parametri zavarivanja	Uzorak „A“
Zaštitni plin	Inoxline C2 (97,5 %Ar + 2,5 %CO ₂)
Protok plina [l/min]	17
Brzina zavarivanja [cm/min]	32

Nominalna jakost struje [A]	220
Očitana jakost struje [A]	241
Nominalni napon [V]	23,5
Očitani napon [V]	21,4
Promjer žice [mm]	1,2
Brzina dodavanja žice [m/min]	9
Slobodni kraj žice [mm]	18
Unos topline [kJ/cm]	7,74



Slika 22. Podešeni parametri za zavarivanje uzorka „A“

Ispitni uzorak „A“ nakon zavarivanja prikazan je na slici 23.



Slika 23. Uzorak „A“

4.3.2. Uzorak „B“

Za zavarivanje ispitnog uzorka „B“ kao zaštitni plin korišten je Messer Inoxline X3 sastava 97 %Ar i 3 %O₂. Na izvoru struje za zavarivanje odabran je program impulsnog zavarivanja nehrđajućih čelika u zaštiti plinske mješavine 98 %Ar i 2 %O₂ koja je najbližnja mješavini u zaštiti koje se zavaruje uzorak „B“ jer se program s mješavinom 97 %Ar i 3 %O₂ ne može podesiti na korištenom izvoru struje.

Parametri zavarivanja uzorka „B“ navedeni su u tablici 8., a na slici 24. prikazano je sučelje izvora struje za zavarivanje nakon unosa parametara i odabira programa za zavarivanje.

Tablica 8. Parametri pri zavarivanju ispitnog uzorka „B“

Parametri zavarivanja	Uzorak „B“
Zaštitni plin	Inoxline X3 (97 %Ar + 3 %O ₂)
Protok plina [l/min]	17

Brzina zavarivanja [cm/min]	32
Nominalna jakost struje [A]	228
Očitana jakost struje [A]	290
Nominalni napon [V]	26,2
Očitani napon [V]	25,6
Promjer žice [mm]	1,2
Brzina dodavanja žice [m/min]	9
Slobodni kraj žice [mm]	18
Unos topline [kJ/cm]	11,14

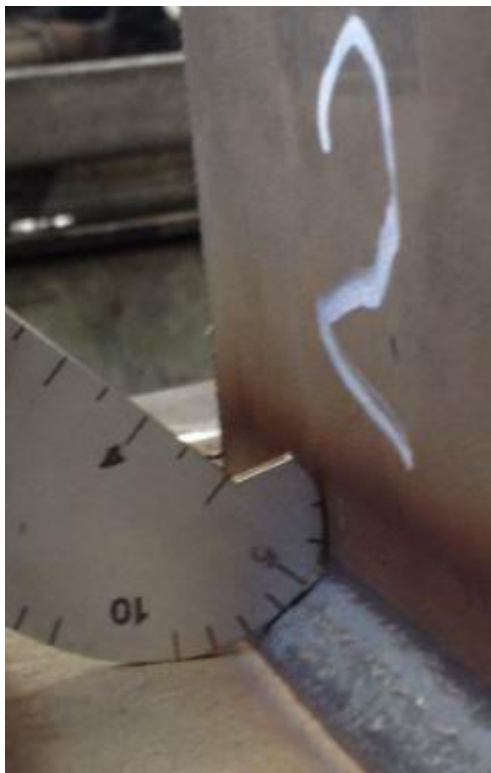


Slika 24. Podešeni parametri za zavarivanje uzorka „B“

Na slikama 23. i 24. vidi se razlika u jakosti struje i naponu. Ti parametri određeni su po sinergiji nakon unošenja brzine dodavanja žice (9 m/min) i odabira određenog programa na

samom stroju. Povećanje jakosti struje i napona rezultat je korištenja drugog zaštitnog plina pri zavarivanju uzorka „B“ (Inoxline X3 sastava 97 %Ar i 3 %O₂).

Ispitni uzorak „B“ nakon zavarivanja prikazan je na slici 25.



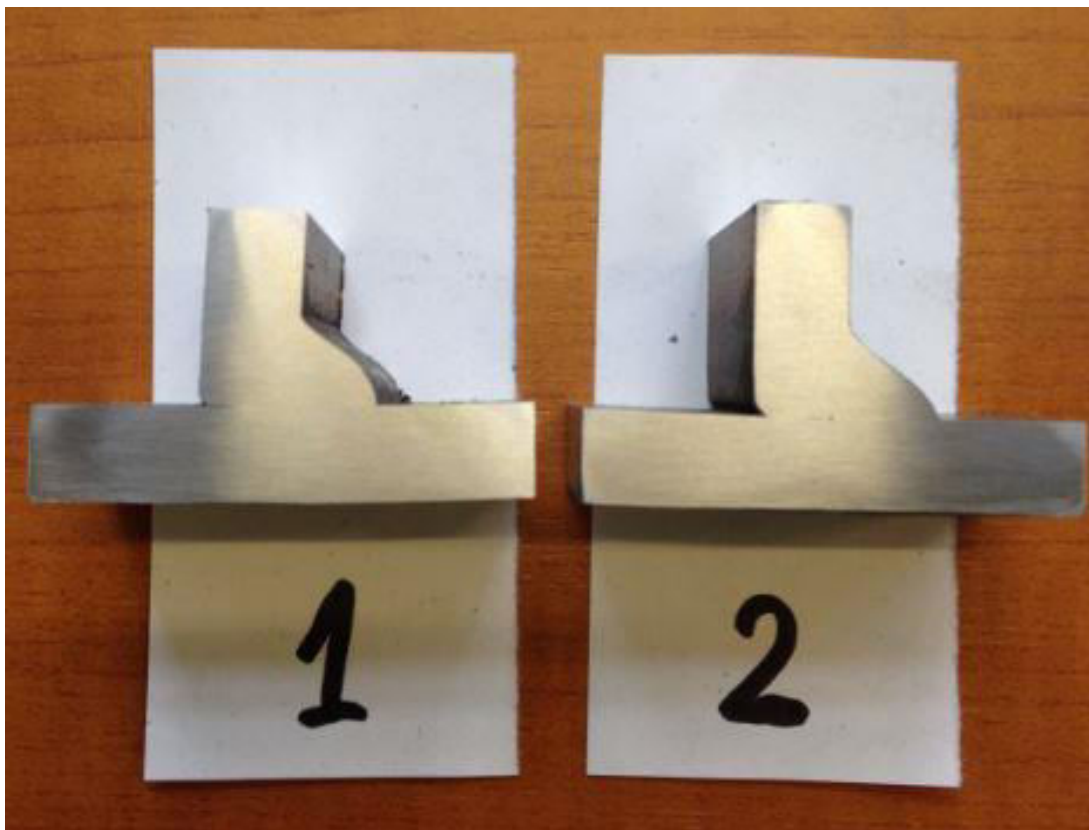
Slika 25. Uzorak „B“

4.4. Izrada makroizbrusaka

Izrada makroizbrusaka uzoraka „A“ i „B“ odvijala se u Laboratoriju za zavarivanje u nekoliko koraka:

- rezanje uzoraka na tračnoj pili,
- grubo brušenje na brusilici s trakom (granulat trake - 150),
- brušenje na brusilici s trakom (granulat trake - 320),
- ručno brušenje na brus papiru (granulat - 500),
- ručno brušenje na brus papiru (granulat - 800),
- ručno brušenje na brus papiru (granulat - 1200).

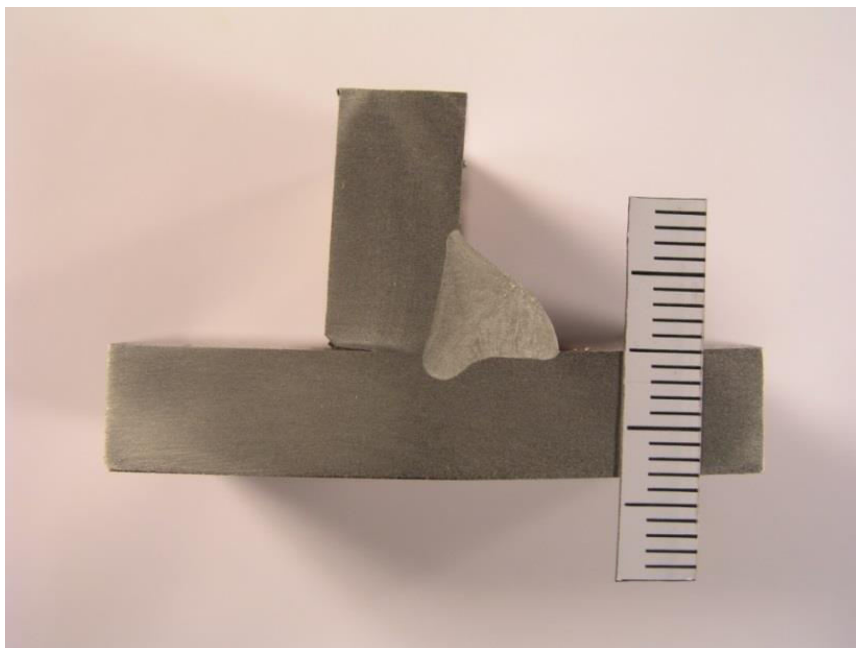
Na slici 26. prikazani su makro izbrusci uzoraka „A“ i „B“ nakon završnog brušenja na brus papiru granulata 1200.



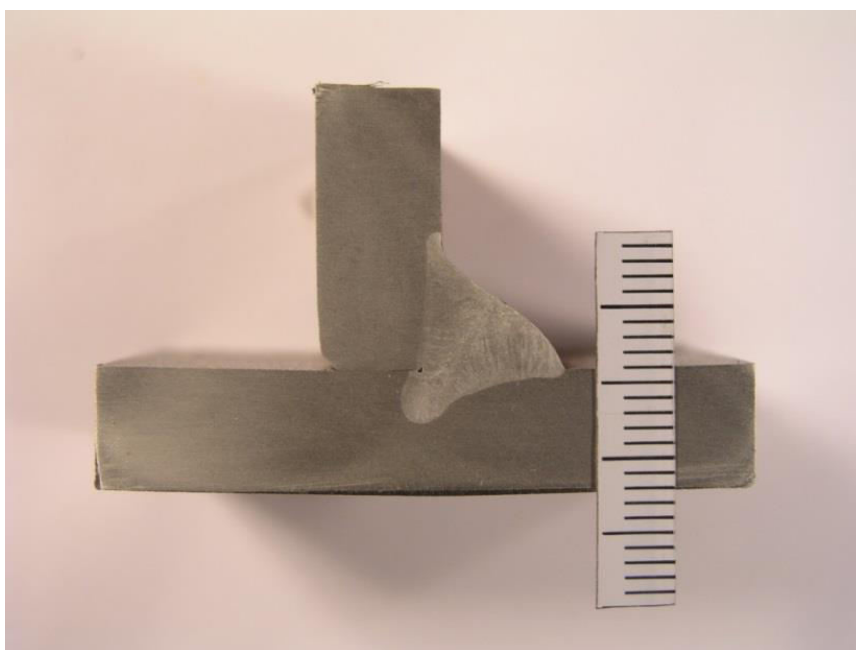
Slika 26. Makroizbrusci nakon završnog brušenja

Makroizbrusci su nakon brušenja podvrgnuti nagrizanju u 10%-tnoj oksalnoj kiselini uz djelovanje struje napona 20 V i jakosti 5 A tijekom 90 s u Laboratoriju za zaštitu materijala.

Na slikama 27. i 28. prikazani su makroizbrusci presjeka zavora nakon nagrizanja u oksalnoj kiselini.



Slika 27. Makroizbrusak presjeka zavora - uzorak „A“

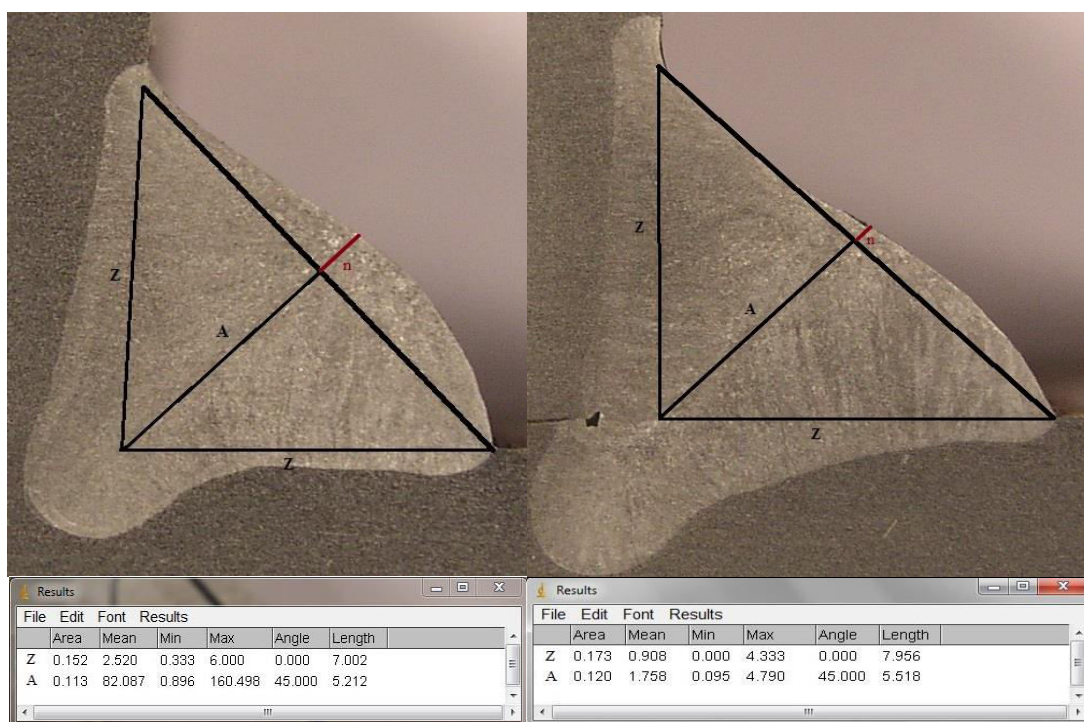


Slika 28. Makroizbrusak presjeka zavora - uzorak „B“

4.5. Geometrija zavora

U geometriji zavora potrebno je izmjeriti bitne dimenzije zavora kao što su visina i širina zavora, površina presjeka zavora te penetracija. Mjerenje je izvršeno u programu „imageJ“ na makroizbruscima presjeka zavora koji su fotografirani u Laboratoriju za materijalografiju.

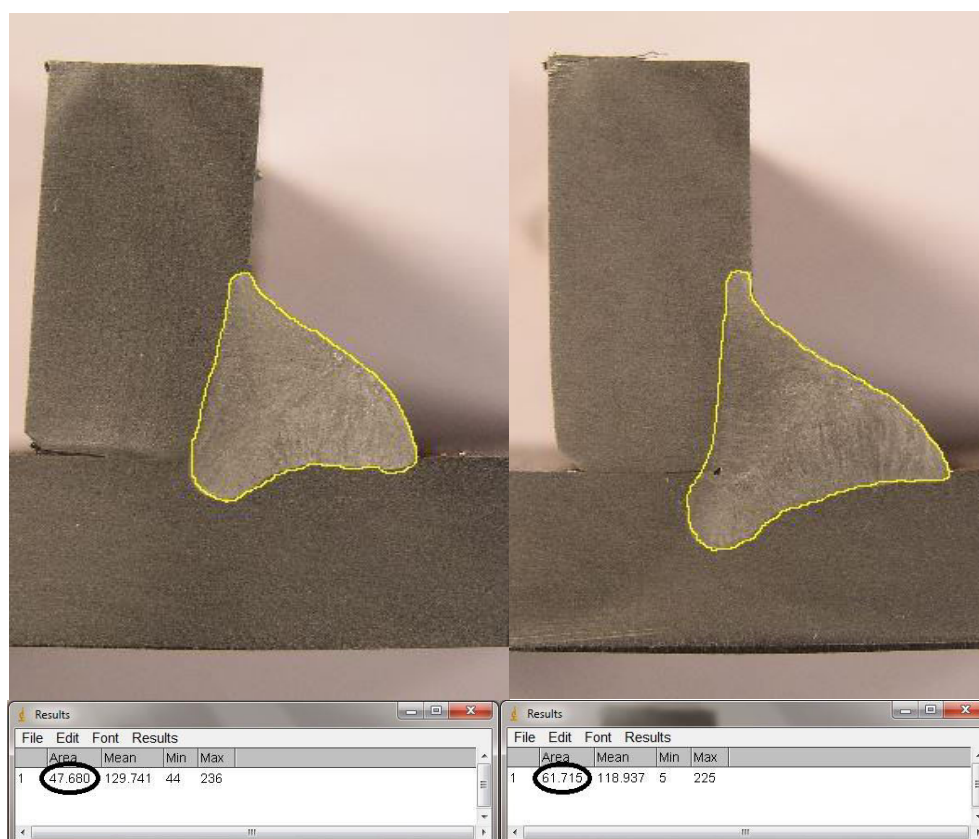
Na slici 29. prikazano je mjerenje širine, visine i nadvišenja zavora uzoraka „A“ i „B“.



Slika 29. Prikaz mjerenja širine i visine zavora. Uzorak „A“ - lijevo, uzorak „B“ - desno

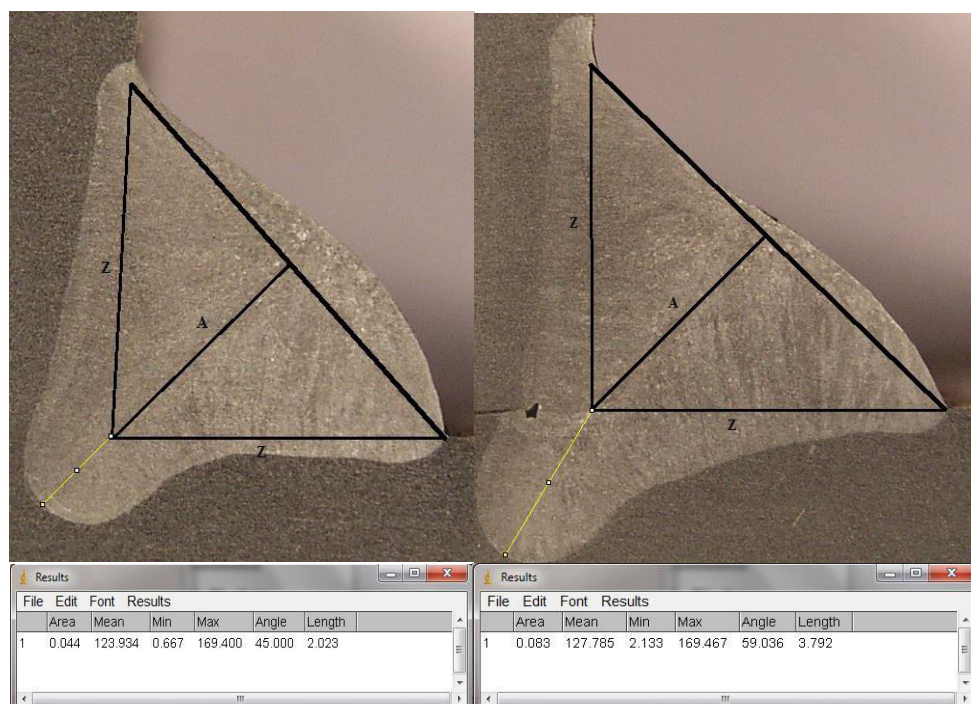
Kod uzorka „A“ nadvišenje zavora n iznosi 1 mm, a kod uzorka „B“ 0,4 mm.

Na slici 30. prikazano je mjerenje površine presjeka zavora uzoraka „A“ i „B“.



Slika 30. Prikaz mjerenja površine presjeka zavora. Uzorak „A“ - lijevo, uzorak „B“ - desno

Na slici 31. prikazano je mjerenje penetracije zavora uzoraka „A“ i „B“.



Slika 31. Prikaz mjerenja penetracije zavora. Uzorak „A“ - lijevo, uzorak „B“ - desno

U tablicama 9. (uzorak „A“) i 10. (uzorak „B“) prikazane su izmjerene veličine zavora.

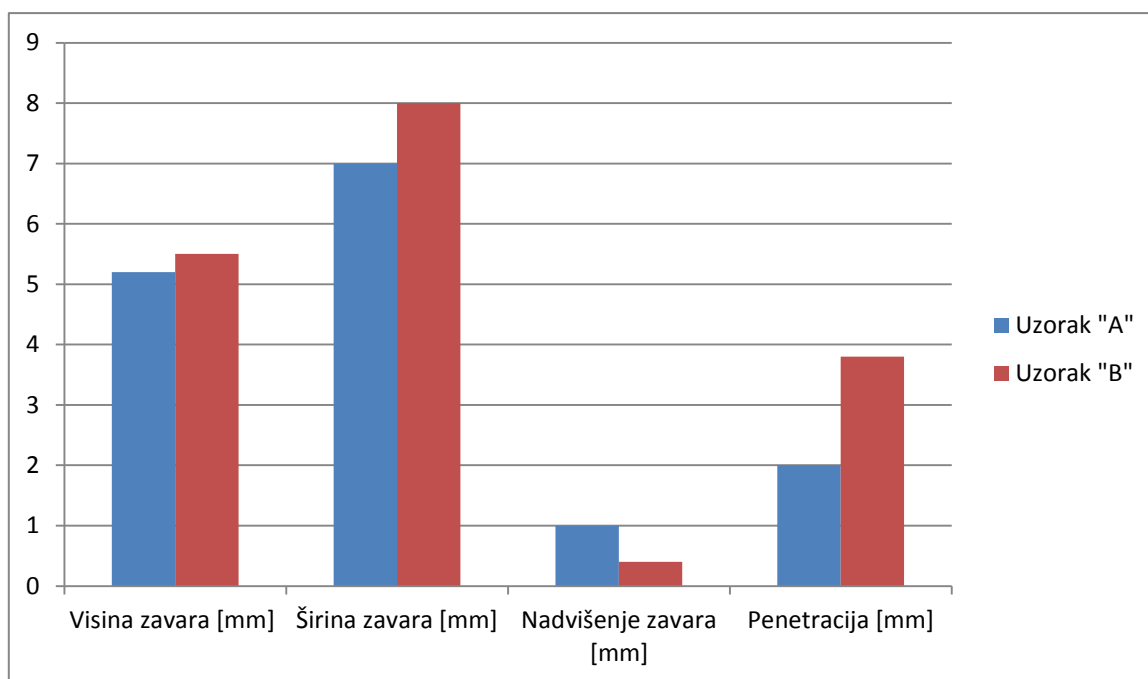
Tablica 9. Izmjerene veličine zavora uzorka „A“

UZORAK „A“	Visina [mm]	5,2
	Širina [mm]	7
	Nadvišenje [mm]	1
	Površina presjeka [mm ²]	47,7
	Penetracija [mm]	2

Tablica 10. Izmjerene veličine zavora uzorka „B“

UZORAK „B“	Visina [mm]	5,5
	Širina [mm]	8
	Nadvišenje [mm]	0,4
	Površina presjeka [mm ²]	61,7
	Penetracija [mm]	3,8

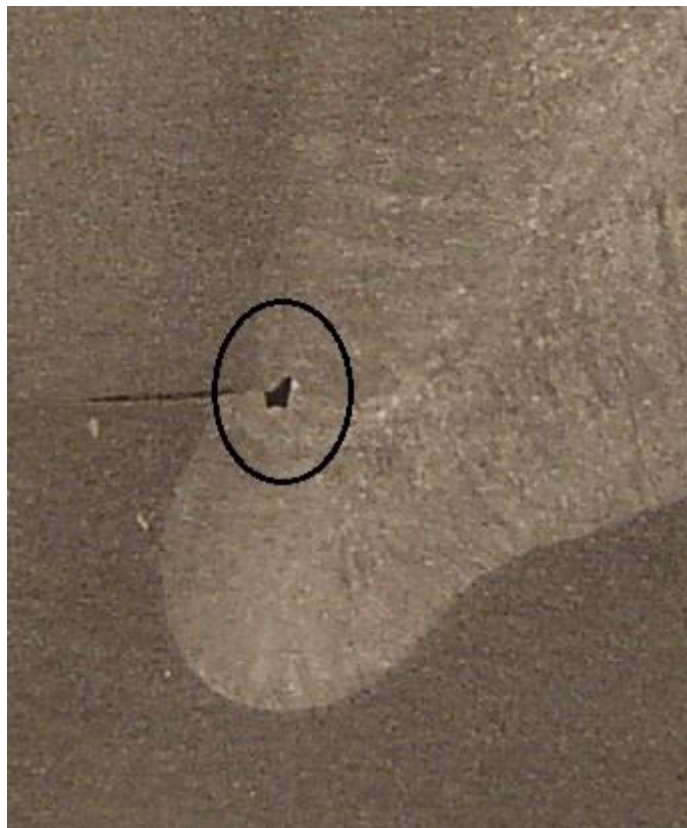
Na slici 32. prikazan je histogram u kojem su uspoređene izmjerene veličine uzorka „A“ i „B“.



Slika 32. Grafički prikaz izmjerenih veličina uzorka „A“ i „B“

Analizom dobivenih rezultata vidljivo je da je uzorak „A“ boljih svojstava od uzorka „B“ kod kojeg se vidi puno veća penetracija što je rezultat veće jakosti struje i djelovanja zaštitnog plina (97% Ar + 3% O₂). Loš utjecaj velikog unosa topline i djelovanja zaštitnog plina vidljiv je i pojavom utonuća na uzorku „B“.

Na slici 33. vidljiva je i pojava šupljine što bitno utječe na čvrstoću zavarenog spoja.



Slika 33. Pojava šupljine na uzorku „B“

Uzorak „A“ je u usporedbi s uzorkom „B“ ukupno gledano puno bolji. Kod uzorka „A“ dobiven je zavar traženih svojstava (pravilne geometrije) bez grešaka, dok se kod uzorka „B“ pojavljuje nekoliko grešaka koje mogu utjecati na mehanička svojstva zavora. Zaključak je da se kod zavarivanja austenitnog čelika X5CrNiMo17-12-2 debljine 8 mm impulsnim MAG postupkom kao bolji izbor pokazao zaštitni plin Inoxline C2 sastava 97,5 %Ar i 2,5 %CO₂.

5. ZAKLJUČAK

Brzo i efikasno zavarivanje nehrđajućih čelika predstavlja jedan od najvećih izazova za stručnjake zbog konstantnog povećanja korištenja nehrđajućih čelika u velikom broju industrija i njihovog konstantnog razvoja. MIG/MAG postupak zavarivanja u današnje vrijeme predstavlja najrašireniji postupak zavarivanja nehrđajućih čelika. Stalnim proučavanjem utjecaja parametara zavarivanja, utjecaja zaštitnih plinova i dodatnog materijala na mehanička svojstva zavarenog spoja teži se njegovom usavršavanju. Optimalna kombinacija parametara zavarivanja, zaštitnog plina i dodatnog materijala daje zavareni spoj traženih svojstava i kvalitete. Zbog toga veliku pažnju treba posvetiti svim navedenim područjima koja direktno utječu jedna na drugu. Impulsni način prijenosa metala pokazao se kao puno povoljniji u usporedbi s prijenosom metala kratkim spojevima ili štrcajućim lukom pri zavarivanju nehrđajućih čelika.

U eksperimentalnom dijelu završnog rada posebna pažnja posvećena je utjecaju zaštitnog plina na profil zavora pri zavarivanju austenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNiMo17-12-2. Analizom dobivenih rezultata (visina zavora, širina zavora, nadvišenje zavora, površina presjeka zavora, penetracija) uz obraćanje pažnje na pojavu grešaka u zavoru (šupljina, nepravilna geometrija zavora) dolazi se do zaključka da se zaštitni plin Inoxline C2 (97,5 %Ar + 2,5 %CO₂) koji se koristio pri zavarivanju uzorka „A“ pokazao kao puno bolji izbor od zaštitnog plina Inoxline X3 (97 %Ar + 3 %O₂) korištenog pri zavarivanju uzorka „B“.

LITERATURA

- [1] Filetin, T.: „Pregled razvoja i primjene suvremenih materijala“, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2000., s interneta,
<http://www.hdmt.hr/wp-content/uploads/2013/01/pregled-razvoja-i-primjene-suvremenih-materijala.pdf> ...dostupno 20.1.2016.
- [2] „Gas Metal Arc Welding“, s interneta,
[http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf](http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf) ...dostupno 20.1.2016.
- [3] Juraga, I. : „Zavarivanje čelika otpornih na koroziju“, Znanstveno - stručni časopis Zavarivanje 37, 1994., ½, str. 3 - 11
- [4] Strawowy, H.: „Proizvodnja nehrđajućih čelika - stanje i razvoj u tehnologiji i gospodarstvu“, Znanstveno - stručni časopis Zavarivanje 39, 1996., ¾, str. 73 - 79
- [5] Juraga, I.; Šimunović, V.; Stojanović, I.: „Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje“, Seminar: „Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici)“, Pula 2007., s interneta,
<http://www.dtzi.hr/upload/pdf/4.%20SEMINAR/1.%20RAD.pdf> ...dostupno 20.1.2016.
- [6] Filetin, T.; Kovačiček, F.; Indof, J.: „Svojstva i primjena materijala“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.
- [7] Kožuh, S.: „Specijalni čelici“ - skripta, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010., s interneta,
<https://www.simet.unizg.hr/nastava/> ...dostupno 20.1.2016.
- [8] Schiller, B.; Kekić, M.: „Atestacija postupaka zavarivanja visokolegiranih korozijski postojanih čelika“, Znanstveno - stručni časopis Zavarivanje 44, 2001., ½, 23 - 26
- [9] Lukačević, Z.: „Zavarivanje“, Strojarski fakultet Slavonski Brod, Slavonski Brod, 1998.
- [10] Zidarić, K.: „Zavarivanje raznorodnih čelika“, Završni rad, Zagreb, 2014.
- [11] <http://www.acroni.si/en/?subpageid=3> ...dostupno 20.1.2016.
- [12] <http://pwtatlas.mt.umist.ac.uk/internetmicroscope/micrographs/microstructures/more-metals/steel/steel-micrographs/stainless-steel/martensite.html> ...dostupno 20.1.2016
- [13] http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/na_dipl4/3_1.pdf ...dostupno 20.1.2016.

- [14] Mateša, B.; Samardžić, I.; Dunder, M.: „Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaeffler-ovog dijagrama“, Slavonski Brod, 2011., s interneta
<https://bib.irb.hr/datoteka/535201.233-243-sbz2011.pdf> ...dostupno 20.1.2016.
- [15] Bee, J.V.; Garrett, G.G.; Taplin, D.M.R.: „Materials Engineering: Proceedings of the First International Symposium“, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa, 1985.
- [16] „Strojevi i oprema za zavarivanje - podloge“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013., s interneta
<https://bib.irb.hr/datoteka/535201.233-243-sbz2011.pdf> ...dostupno 20.1.2016.
- [17] Garašić, I.: Autorizirana predavanja iz kolegija „Postupci zavarivanja“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, s interneta
https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/?action=view&site_id=90&id=1548 ...dostupno 20.1.2016.
- [18] Kralj, S.; Andrić, Š.: „Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [19] Rudan, M.: „Zavarivanje u zaštiti plina taljivom elektrodom (MIG/MAG) - Glavna obilježja i područja primjene“, Društvo za tehniku zavarivanja Istra, Pula, 2005., s interneta
<http://www.dtzi.hr/upload/pdf/2.%20SEMINAR/Brosura%20seminar%202.pdf> ...dostupno 20.1.2016.
- [20] <http://www.wballoys.co.uk/MIG/images/welding-short-circuiting-transfer.jpg> ...dostupno 20.1.2016.
- [21] Rudan, M.: „Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom“, Pula, 2007., s interneta
<http://www.dtzi.hr/upload/pdf/4.%20SEMINAR/2.%20RAD.pdf> ...dostupno 20.1.2016.

PRILOZI

I. CD-R disc